



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## ANALÝZA MĚŘENÍ PID DEGRADACE FV MODULŮ NA BÁZI KŘEMÍKU

ANALYSIS OF PID MEASUREMENT OF DEGRADATION OF SILICON PV  
MODULES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Baklík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Hylský

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství  
Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Radim Baklík

**ID:** 147395

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/2017

## NÁZEV TÉMATU:

**Analýza měření PID degradace FV modulů na bázi křemíku**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznatme se s problematikou měření diagnostiky a analýzy FV systémů. Zaměřte se především na sledování snížení účinnosti FV modulů vlivem nepředvídatelných degradačních procesů, jako je PID degradace (Potenciálem Indukovaná Degradace).

Zrealizujte pracoviště pro degradaci a regeneraci PID senzitivních fotovoltaických modulů. Jako součást pracoviště zapojte přístroj pro měření svodových proudů, sloužící jako ukazatel velikosti rozsahu degradace FV modulů. Pro kontrolu rozsahu PID degradace na jednotlivých FV modulech změřte v pravidelných časových intervalech jejich VA – charakteristiky a proveďte elektroluminescenční měření. Získaná data zpracujte a zjistěte, zda je možné identifikovat degradaci PID pomocí měření svodových proudů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucí práce.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 25.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Josef Hylský

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně/ Technická 3058/10 / 61600 / Brno

BAKLÍK, R. *Analýza měření PID degradace FV modulů na bázi křemíku*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 61 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Josef Hylský.

# ANOTACE

Diplomová práce se zabývá krystalickými fotovoltaickými moduly v návaznosti na fenomén PID. Práce se zaměřuje na metody zkoumání měnících se elektrických veličin, jako je paralelní odpor a svodový proud, při probíhající degradaci. Zkoumán bude vliv degradace na V-A charakteristiky modulů a porovnání metodou elektroluminiscence.

**Klíčová slova:** PID, degradace fotovoltaického modulu, datalogger, krystalický křemíkový článek, regenerace článků, elektroluminiscence

# ANNOTATION

Diploma thesis deals with crystalline solar modules in relation to PID phenomenon. The thesis focuses on methods of investigation of changing electrical parameters, in the course of PID degradation, such as parallel resistance and leakage current. The effect of degradation will be examined by V-A characteristics and by electroluminescence method.

**Key words:** PID, solar module degradation, datalogger, crystalline silicon cell, PID regeneration, electroluminescence

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Josefa Hylského a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použité literatury na konci práce.

Jako autor diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s vytvořením této práce neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25.05.2017

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Hyskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a velmi cenné rady při směřování a zpracování diplomové práce a panu Martinu Šturmovi za umožnění využití prostor pro měření charakteristik fotovoltaických modulů.

V Brně dne 25.05.2017

.....

podpis autora

1	Úvod.....	8
2	Teoretický úvod.....	9
2.1	Polovodiče .....	9
2.2	P-N přechod .....	11
2.3	Sluneční záření a fotovoltaický jev.....	12
2.3.1	Sluneční záření .....	12
2.3.2	Fotovoltaický jev.....	12
2.4	Fotovoltaický článek.....	14
2.4.1	Generace fotovoltaických článků.....	15
2.4.1.1	Články první generace .....	15
2.4.1.2	Články druhé generace (tenkovrstvé články).....	16
2.4.1.3	Články třetí generace .....	17
2.4.2	Výroba křemíku v elektrotechnice .....	19
2.4.3	Proces výroby monokrystalických modulů.....	21
2.4.4	Parametry fotovoltaických článků .....	24
2.5	Defekty fotovoltaických modulů .....	27
2.5.1	PID degradace .....	29
2.6	Metody diagnostiky defektů .....	34
2.6.1	VA charakteristika (FLASH tester) .....	34
2.6.2	Elektroluminiscence.....	35
3	Praktická část.....	36
3.1	Agilent Vee – datalogger .....	36
3.2	Měření sendvičové struktury analyzátozem Tettex.....	38
3.3	PID degradace fotovoltaického modulu.....	39
3.4	PID degradace mini-modulu .....	47
4	Závěr.....	51
5	Seznam zkratk .....	52
6	Zdroje .....	53
7	Seznam obrázků .....	58
8	Seznam tabulek .....	60

9	Příloha .....	61
---	---------------	----

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se bude zabývat metodami zkoumání a reprodukce PID degradace fotovoltaických modulů a článků. Vliv PID degradace modulů v systémech fotovoltaických elektráren se stává podstatným problémem při řešení otázky účinnosti systémů z krystalického křemíku. Stále se zvětšující nároky na materiály ve fotovoltaice se zvyšujícím se napětím ve strinzích FV systémů dávají dobré podmínky pro vznik PID degradace v průběhu života fotovoltaických elektráren. Práce se bude zabývat jak metodami reprodukce PID degradace, tak zjištění výchozích vlivů ovlivňujících proces degradace.

V teoretické části bude charakterizován solární článek z hlediska fyzikálního. Budou popsány jevy a mechanismy, které umožňují přeměnu Slunečního záření na elektrickou energii. Články budou z hlediska typů kategorizovány do generací. Část teoretického úvodu bude věnována také výrobě křemíku pro fotovoltaiku s následným zpracováním až po výsledný fotovoltaický modul. V návaznosti na fotovoltaické články budou vysvětleny jednotlivé elektrické parametry používané při popisu článků, nejčastější defekty článků a diagnostické metody, které tyto defekty odhalují.

Praktická část práce bude sestávat z měření charakteristik FV modulů a jejich ovlivnění PID degradací. Na konkrétních článcích a modulu budou sledovány projevy degradace na charakteristikách. Pro potřeby těchto měření bude naprogramován automatický měřicí a ovládací program za pomoci softwaru Agilent VEE, který bude ovládat měřicí prvky a zaznamenávat hodnoty v čase.

Práce se zaměřuje na PID degradaci způsobenou rozdílem elektrických potenciálů mezi články a rámem modulu. Zkoumán bude vliv teploty a elektrického pole na rychlost probíhající degradace.

Každý degradovaný modul bude podroben regeneraci s následným proměřením charakteristik a porovnáním s počátečním stavem. Porovnávat se budou V-A charakteristiky a elektroluminescenční metoda, jíž lze probíhající PID degradaci identifikovat.



## 2 Teoretický úvod

### 2.1 Polovodiče

Polovodič je pevná látka, či sloučenina, která za určitých podmínek dokáže vést elektrický proud. Jeho vodivost závisí na vnějších a vnitřních podmínkách konkrétního případu. Nejčastěji se jedná o prvky IV skupiny, které jsou v praxi využívány nejvíce (Křemík, Germánium), dále pak o sloučeniny III a V skupiny, jako například Galium-Arsenid, anebo II a VI skupiny (Sulfid Kadmia).

Pro změny vnějších podmínek slouží většinou dodání některého typu energie, jako je například energie elektrická, tepelná nebo světelná. Jednou z vnitřních podmínek může být naopak dodání příměsi, tedy dotace do polovodičové struktury. Podle množství a typu příměsi (pokud obsahuje) můžeme polovodiče následovně rozdělit:

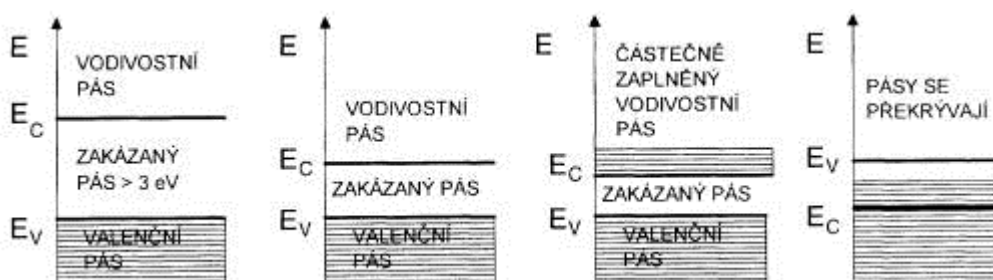
- 1 Polovodiče intrinsické (bez příměsi)
- 2 Polovodiče extrinsické (obsahující příměs)
  - a. P typu
  - b. N typu

Vlastní neboli intrinsické polovodiče, jsou čisté látky, bez příměsí a nečistot. Jejich vodivost je určena složením a ovlivněna dodanými energiemi. Přijetí energie má za následek vypuzení elektronu z valenčního obalu atomu. Po tomto atomu vznikne v orbitalu prázdné místo, které označujeme jako díra. V ideálně čistém vlastním polovodiči by s narůstající energií narůstala velikost koncentrace nosičů a to jak děr, tak elektronů stejně, neboť díry a elektrony jsou generovány v páru.

Na elektrické vlastnosti mají zásadně vliv i nečistoty nebo příměsi. Ty se do čistého materiálu zavádějí i uměle, metodou zvanou dotování. Pro křemík jako čtyřvazný prvek se obecně používají dva druhy dotací. Přidáním třívazné příměsi, tzv. akceptoru, kterou může být například Bór, či Indium, se vytvoří tři plnohodnotné vazby a jedna vazba, která postrádá elektron. Na místě tohoto chybějícího elektronu je vytvořena díra – což je imaginární částice s nábojem stejné velikosti, jako náboj elektronu, jenže kladným. Oproti tomu přidáním pětivazné příměsi, jako je Fosfor, či Antimon, jsou sice vytvořeny čtyři vazby s křemíkem, ale stále je volný jeden elektron navíc, jedná se o tzv. donor. Tento volný elektron má pak za následek elektronovou vodivost.

Podle typu majoritních částic, jež vedou elektrický proud, rozdělujeme polovodiče na dva typy. Pokud převládají elektrony, hovoříme o polovodiči typu N, naopak, pokud jsou většinovými nosiči díry, hovoříme o P typu polovodiče. Schopnost vedení elektrického proudu v polovodiči nebo v pevné látce obecně je na atomární úrovni podmíněna dodáním dostatečného množství energie elektronu (díře), aby se mohl vymanit z vazby. Pro popsání tohoto jevu slouží pásový model atomu.

Pásový model je schéma, sestávající (pro polovodiče) ze tří různých pásů. Jedná se o valenční pás, zakázaný pás a vodivostní pás. Ukazuje, jak velké množství energie je potřeba dodat pro zajištění vodivosti daného elektronu (díry), aby elektron přešel z valenčního pásu do vodivostního.



**Obrázek 1: Pásový modely pevných látek [1]**

Obrázek 1 ukazuje rozdělení pásů pro tuhé látky. Z tohoto hlediska je můžeme rozdělit na tři skupiny. Jako první jsou izolanty, které takřka nevedou žádný proud. Šířka zakázaného pásu je větší než 3 eV a potřebná energie pro excitaci elektronu je tudíž moc velká. Polovodiče jsou vlastně izolanty, s šířkou zakázaného pásu typicky kolem hodnot 0,1 – 2 eV. Polovodiče mají při teplotě 0 K zakázaný pás úplně vyprázdněný, chovají se jako izolanty a nevedou žádný proud. Nicméně při zvyšující se teplotě se začíná uplatňovat tepelná generace nosičů. Poslední skupinou jsou kovy – vodiče. Kovy vedou elektrický proud i při nízkých teplotách velmi dobře. Šířka jejich zakázaného pásu je malá nebo se dokonce vodivostní a valenční pás překrývají. Elektrony proto nepotřebují téměř žádnou energii k přechodu. Pokud se pásy překrývají, hovoříme o tzv. elektronovém plynu.

Pro intrinsický polovodič platí, že Fermiho hladina leží přesně uprostřed zakázaného pásu. Při dotaci polovodiče příměsí se vlivem zvýšení koncentrace nosičů mohou v zakázaném pásu vytvořit tzv. kvazihladiny. Po dodání aktivační energie přejde díra z valenčního pásu na akceptorovou hladinu resp. elektron na donorovou hladinu. Šířka zakázaného pásu se tím sníží a tím se výrazně zvýší vodivost polovodiče.

Zvyšováním koncentrace příměsí se donorová, resp. akceptorová hladina mohou dostat až za hranice zakázaného pásu, v tu chvíli hovoříme o degenerovaném polovodiči, který se chová jako kov.

Vlastní koncentrace nosičů je množství volných elektronů a děr, které se při dané teplotě v polovodiči vyskytují. [2] [3]

## **2.2 P-N přechod**

P-N přechod je oblast na rozhraní polovodiče typu N a polovodiče typu P. V místě dotyku polovodičů dochází v prudké změně koncentrací příměsí a tím i ke změně koncentrace volných nosičů. Volné díry strany P a zároveň volné elektrony ze strany N difundují směrem k přechodu, kde společně rekombinují. Zároveň se v oblasti přechodu na straně P tvoří záporný prostorový náboj, který odpuzuje volné elektrony na straně N a obráceně kladný prostorový náboj strany N odpuzuje volné díry ze strany P. Kolem přechodu tak vznikne vyprázdňená oblast.

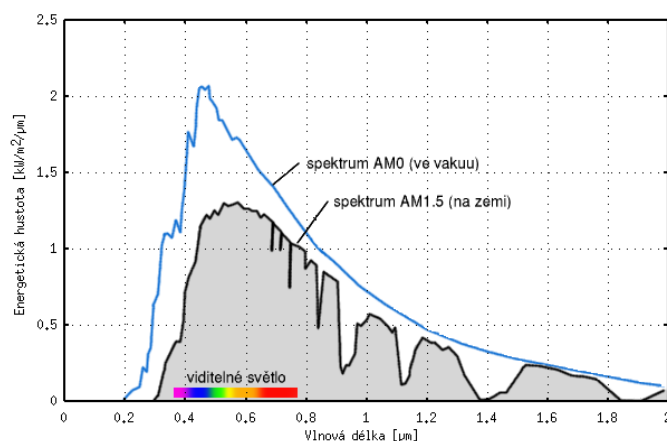
Pokud PN přechod opatříme kontakty a přiložíme napětí, mohou nastat dvě situace, závislé na polaritě napětí. Vnější napětí připojené se stejnou polaritou, jako má difuzní napětí, způsobí, že kladná polarita na straně N přitahuje elektrony a záporná polarita na straně P přitahuje díry. Nosiče jsou odstraňovány z oblasti přechodu a tím dojde ke zvýšení potenciálové bariéry. Hovoříme o závěrně polarizovaném PN přechodu.

Pokud naopak připojíme vnější napětí opačnou polaritou, než v předchozím případě, kladné napětí v oblasti P způsobí, že se díry tlačí ze strany P směrem do oblasti přechodu a to samé se děje s elektrony na straně N. Pokud má napětí dostatečnou velikost, vyprázdňená oblast v PN přechodu zmizí a polovodič začíná vést elektrický proud. Toto napětí se také označuje jako prahové. [4]

## 2.3 Sluneční záření a fotovoltaický jev

### 2.3.1 Sluneční záření

Záření, které je pro fotovoltaiku nejdůležitější je Sluneční. Pro moduly je kritické, aby nejlépe absorbovaly fotony právě s takovou energií, které jsou v co největší míře ve slunečním záření obsaženy. Pokud se podíváme na Obr. 2 je zde jasně vidět, že nejpodstatnější složku tvoří záření s vlnovou délkou od 400 nm do 800 nm, což je právě viditelné spektrum. Při testování modulů jsou podmínky standardně dány spektrem záření označeným jako AM 1,5.



Obrázek 2: Spektrum záření Slunce [5]

AM 1,5 je takové spektrum záření, jaké dopadá na zemský povrch při jasném slunečném dni bez mraků. Je tedy výrazně ovlivněno zemskou atmosférou, kterou prochází, láme se v ní nebo odráží a částečně je také absorbováno, dále také úhlem svírajícím s povrchem Země, díky změně úhlu se prodlužuje nebo zkracuje vzdálenost, kterou musejí fotony v zemské atmosféře urazit, což podstatně ovlivňuje jejich absorpci a rozptýl v atmosféře. Záření Slunce je obecně tvořeno dvěma složkami. Jedná se o složku přímou, což je ta část záření, která putuje přímo od Slunce a není ani odražená, ani nijak rozptýlená a složku difúzní, to je naopak záření, které původně nesměruje např. na fotovoltaický modul, ale při své cestě atmosférou je změněn jeho směr. Poměrná velikost difúzní složky záření v přímém se například silně zvyšuje v závislosti na atmosférické oblačnosti, od asi 10 % při jasné obloze, až po 100 % při silné oblačnosti. [6]

### 2.3.2 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev je zjednodušeně řečeno přeměna sluneční energie na energii elektrickou. Poprvé byl objeven Německým fyzikem Heinrichem Hertzem, v souvislosti s jeho výzkumem rádiových vln. Hertz zjistil, že pokud osvítl dvě kovové elektrody, které jsou pod napětím, světlo způsobí změnu napětí na těchto elektrodách. Spojení mezi světlem a elektrinou bylo následně potvrzeno dalším fyzikem Josephem Thompsonem

v roce 1897, ten zjistil, že při osvětlení kovového povrchu jsou uvolňovány částice, identické elektronům.

Nejvýznamnější počín v oblasti fotoelektrického jevu však učinil Albert Einstein, který předpokládal, že světlo se pohybuje v kvantech energie, nazývaném fotony. Tyto fotony pak předávají svoji energii, při průchodu látkou, elektronům. Elektrony následně mohou získat dostatek energie, až se vymaní ze své vazby. Tuto veličinu nazval výstupní práce. Nadbytek energie, kterou elektron přijme od fotonu, se přemění v určité množství kinetické energie. Vztah je vyjádřen v následující rovnici:

$$E_k = E - \Phi \quad (1)$$

,kde  $E_k$  je maximální kinetická energie elektronu,  $E$  vyjadřuje energii fotonu,  $\Phi$  [eV] je velikost výstupní práce elektronu.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

$$\Phi = hf_0 \quad (3)$$

V rovnicích jsou vyjádřeny velikost energie fotonu, která závisí pouze na jeho frekvenci, resp. vlnové délce a výstupní práce elektronu závisující na materiálu, respektive na šířce zakázaného pásu. Výsledná rovnice pak bude vypadat takto:

$$E = hf - hf_0 \quad (4)$$

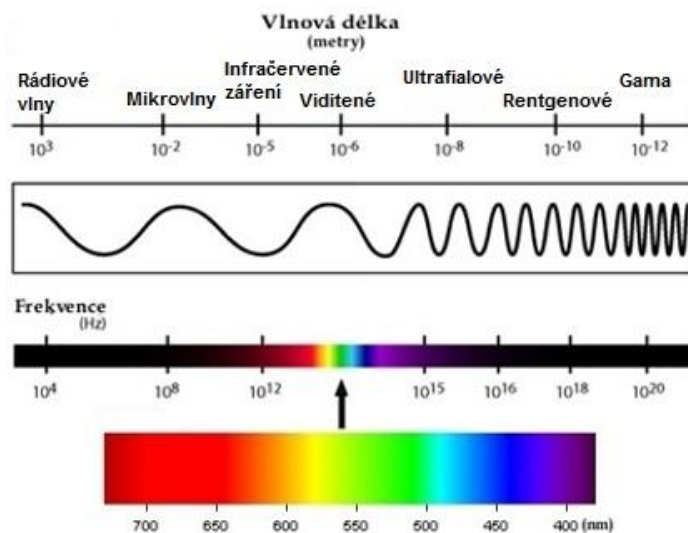
Maximální kinetickou energii elektronů (nesoucích náboj  $e^-$ ) můžeme také odvodit z brzdícího potenciálu.

$$V_0 = \frac{W}{q} = \frac{E_k}{e} \rightarrow E_k = eV_0 \quad (5)$$

Množství fotoelektronů, emitovaných z povrchu může být určeno pomocí rovnice fotoelektrického proudu.

$$I = \frac{q}{t} = \frac{ne}{t} \quad (6)$$

Z uvedených rovnic vyplývá, že fotoelektrický jev není závislý na intenzitě záření dopadajícího na povrch látky, nýbrž na vlnové délce (frekvenci). Každá látka má minimální frekvenci  $f_0$ , resp. maximální vlnovou délku  $\lambda_0$ , při které je dodáno dostatek energie, aby se elektron vymanil ze své vazby.



**Obrázek 3: Spektrum elektromagnetického záření [8]**

Pokud foton nese dostatek energie, mohou v polovodičích nastat dva případy.

- Vnitřní fotoelektrický jev
- Vnější fotoelektrický jev (fotoemise)

Pokud je elektron vyražen z elektronového obalu atomu, ale nemá dostatečnou energii na opuštění materiálu, hovoříme o tzv. vnitřním fotoelektrickém jevu. Zapříčiňuje pouze zvýšení lokální vodivosti polovodiče.

Pro využití ve fotovoltaice je třeba, aby byl elektron vyražen z materiálu a doputoval až na elektrodu na povrchu fotovoltaického článku. Množství takových elektronů generuje určité napětí a při připojení zátěže může obvodem protékat elektrický proud.[9]

## 2.4 Fotovoltaický článek

Historie fotovoltaiky je přímo spjatá s objevením fotoelektrického jevu. V roce 1887 objevil Hertz závislost elektřiny a světla, když zjistil, že elektrický výboj vzniká snadněji mezi elektrodami, na které dopadá ultrafialové záření. Podstatnou roli sehrál už zmíněný fotoelektrický jev, za nějž dostal Einstein Nobelovu cenu v oblasti fyziky a na něj navázali další fyzici. Fotovoltaický jev, tedy vznik napětí působením světla byl ovšem pozorován už v roce 1876. První články na bázi selenu, sice s účinností nižší než 1%, byly

vyrobeny roku 1883, ale první křemíkový článek až roku 1940, kdy Russel Ohl vyrobil PN přechod na křemíku, který po osvětlení generoval proud.

Fotovoltaický článek je zařízení, které využívá fotoelektrického jevu. Toto zařízení přijímá sluneční energii ve formě fotonů a mění ji na energii elektrickou. Elektrická energie pak protéká obvodem ve formě stejnosměrného proudu, chová se jako dioda s velkou plochou přechodu PN. Pro větší vytvořený výkon se obvykle fotovoltaické články skládají do větších celků, které nazýváme fotovoltaické moduly.

V dnešní době existuje velké množství materiálů, z nichž se fotovoltaické články vyrábějí. Nejběžněji jsou články vyráběny z křemíku, vzhledem k dobré účinnosti a dostupnosti technologií. Podle technologie je možno rozdělit na tři generace. [10]

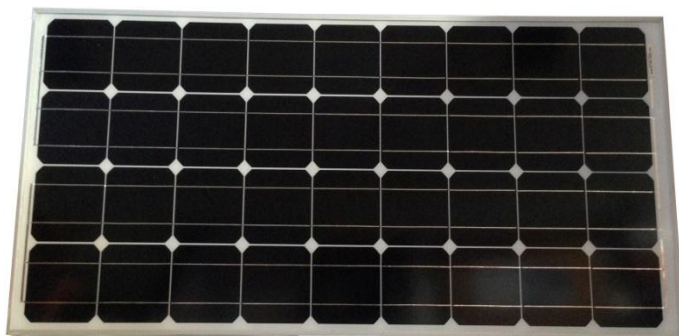
#### **2.4.1 Generace fotovoltaických článků**

Fotovoltaické moduly můžeme rozdělit do třech kategorií, neboli generací. Do první generace spadají články z křemíku, které na trhu dominují, jejich účinnost se pohybuje typicky kolem 15-20%. Druhou generací jsou takzvané tenkovrstvé články, tyto mohou být vyrobeny z amorfního křemíku, případně zde spadají také CIS (CIGS) a CdTe struktury. Do třetí generace řadíme články z organických polymerů nebo molekul, do této kategorie řadíme také některé experimentální vícepřechodové články. [36]

##### **2.4.1.1 Články první generace**

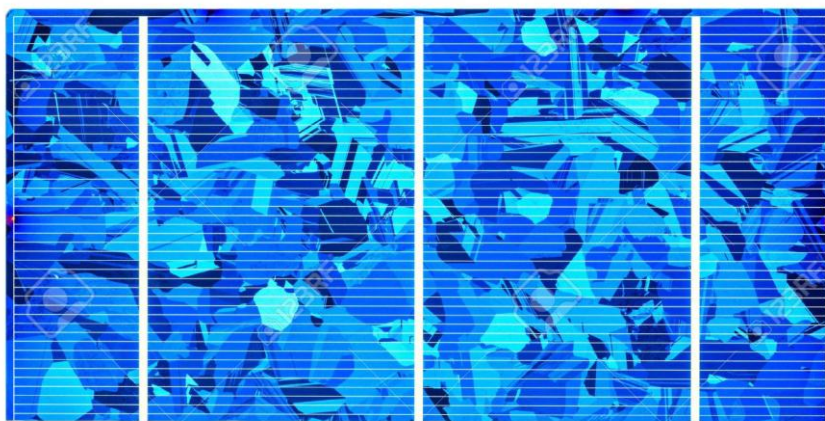
- a. Monokrystalické křemíkové články
- b. Polykrystalické křemíkové články
- c. Hybridní články

Vzhledem k vysoké čistotě křemíku, mají tyto moduly velmi vysokou účinnost, z toho také vyplývá úspora prostoru, kdy na stejné množství vyprodukované energie připadá menší plocha. Oproti polykrystalickým modulům pracují lépe i při zhoršených světelných podmínkách. Nevýhodou je ale vyšší cena, kvůli nákladnější technologii výroby. Mají relativně vysokou účinnost, až kolem 15-23 %.



**Obrázek 4: Modul z monokrystalického křemíku [23]**

Polykrystalické články jsou levnější variantou. V tomto případě není potřeba stejná orientace atomů v krystalové mřížce. Technologie výroby je pak daleko jednodušší a nevyužívá se zde Czochralského metody. Surový křemík je roztaven a vlit do čtvercové formy a po ochlazení se z něj přímo řezou čtvercové wafery. Na rozdíl od monokrystalických článků je technologie daleko jednodušší, proto je i cena menší. Nicméně efektivita modulů je nižší, pohybuje se asi kolem 13-16 % vlivem rekombinace nosičů na rozhraní zrn. Moduly je vhodné použít např. v pouštních oblastech, kde není přítomna častá oblačnost, jelikož jsou citlivější na snížení intenzity světla, navíc v těchto oblastech není plocha rozhodujícím kritériem. [24] [25]



**Obrázek 5: Článek z polykrystalického křemíku [26]**

#### **2.4.1.2 Články druhé generace (tenkovrstvé články)**

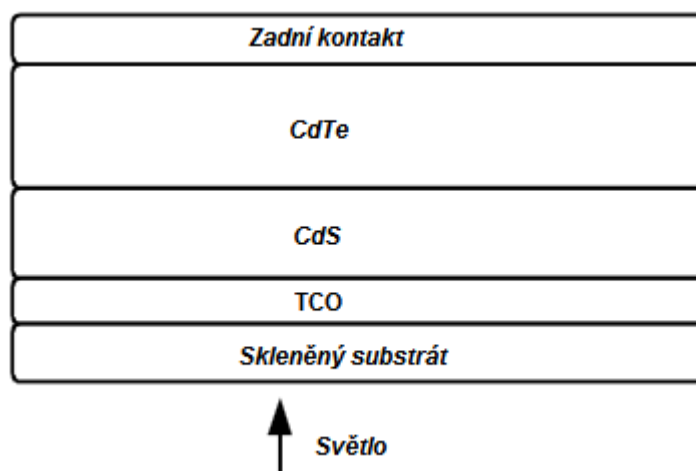
- a. Amorfni křemíkové články (a-Si)
- b. Kadmium-Telluridové články (CdTe)
- c. CIS (CIGS) články

Amorfni křemík je nekystalická forma křemíku. Jedná se o nejvyvinutější tenkovrstvou technologii, která je na trhu již přibližně 15 let. Široce je používána např. u kapesních kalkulátorů se fotovoltaičným článkem, ale její využití se uplatní i u domácností apod.

Amorfni křemíkové moduly jsou vytvořeny napařováním tenké vrstvy materiálu. Tloušťka vrstvy se pohybuje okolo 1  $\mu\text{m}$ . Nanášení probíhá na substrát, který může být skleněný nebo kovový. Vzhledem k tomu, že napařování křemíku je možno provádět již při teplotě 75 °C, základním materiálem může být i plast.

Články CdTe/CdS jsou velmi vhodné pro přípravu ve formě tenkých vrstev. Proces, kterým se vrstvy vyrábí, je poměrně rychlý a jednoduchý. Složení struktury lze vidět na obrázku 12. [27]





**Obrázek 6: Složení vrstev Fotovoltaického článku CdTe/CdS [28]**

Ze strany, z které požadujeme průchod světla, se nachází skleněný substrát a následně TCO. TCO zastupuje „transparent conducting oxide“, tedy průhledný vodivý oxid. Aby bylo možné jej použít v těchto fotovoltaických článcích, je potřeba, aby splňoval některé požadované vlastnosti. Jako je vysoká propustnost světla, rezistivita menší, než  $2 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$  a dobrá teplotní stabilita.

CIGS materiál je polovodičová struktura I-III-VI<sub>2</sub>, složená z mědi, india, galia a selenu. Jedná se o pevný roztok dvou směsí, jedna sestává z mědi, india a selenu a druhá z mědi, galia a selenu.

CIGS je tetraedrický polovodič s krystalovou strukturou chalkopyritu. Kvůli vysokému absorpčnímu koeficientu (více, než  $10^5$  pro elektrony s energií rovnou nebo vyšší 1,5 eV), absorbuje materiál všechny dopadající fotony ve velmi úzké vrstvě a je proto velmi vhodný pro výrobu tenkovrstvých fotovoltaických článků.

Články Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> jsou obvykle vyráběny pomocí vysokoteplotním procesem depozice (HTDP), při teplotě kolem 550 °C, která se přibližuje teplotě, kdy měkne sodnovápenaté sklo, používané často jako substrát. [28]

#### **2.4.1.3 Články třetí generace**

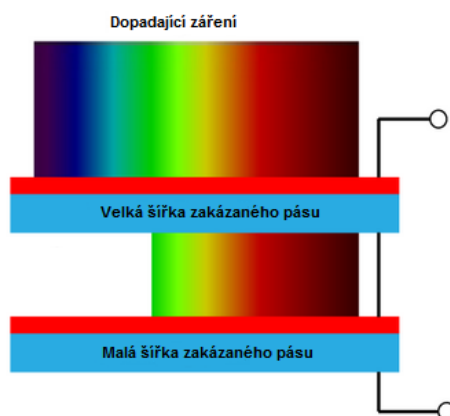
- a. Polymerní organické články
- b. Organické články

Příkladem článků třetí generace může být polymerní organický fotovoltaický článek. Jak už název napovídá, jedná se o článek, který jako aktivní vrstvu využívá organický materiál, např. konjugovaný polymer. Tedy polymer, jenž pravidelně střídá jednoduchou a dvojnou kovalentní vazbu v hlavním řetězci makromolekuly. Základní princip funkčnosti přeměny sluneční energie na elektromagnetickou je u těchto článků stejný, jako v případě polovodičů. Uplatňuje se zde také fotoelektrický jev.

Fakt, že polymerní látky se mohou chovat jako polovodiče, byl objeven v roce 2000. Články z těchto materiálů poněkud zaostávají za klasickými články např. z Křemíku apod., nicméně do budoucna mají rozhodně několik výhod. Hlavní výhodou je schopnost připravit polymery z roztoku, což otevírá možnosti uplatnění například pro 3D tiskárny, navíc není potřeba drahé a složité metody při přípravě modulu. Velké plus představuje také jejich flexibilita a nízká cena materiálu, což může být značně zjednodušující pro aplikaci, jelikož se dá modul jednoduše srolovat a přemístit. [29]

Nevýhodou je ale velmi krátká životnost ve srovnání s moduly z křemíku, kdy se udává doba životnosti někdy až 25 let. Polymerní moduly mají životnost podstatně kratší, maximálně asi jeden rok. Také jejich účinnost je podstatně nižší. Udává se asi 10 %. [30]

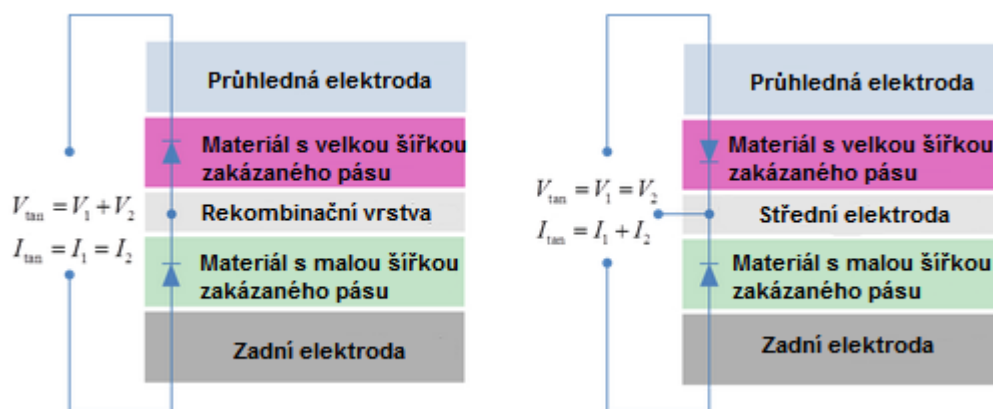
Jednou z metod, která by u modulů dokázala zvýšit účinnost, je použití více přechodů, z nich každý je optimalizován pro určitou část spektra záření. Tyto články se nazývají tandemové.



**Obrázek 7: Tandemový fotovoltaický článek[31]**

Jak lze vidět v obrázku 12, kde je článek složen ze dvou (může být i více). Horní má větší šířku zakázaného pásu a tudíž absorbuje jen fotony vyšší energie, pokud není energie fotonu dostatečná, pak (v ideálním případě) prochází až k dalšímu přechodu, který má šířku zakázaného pásu nižší a tyto fotony dokáže absorbovat.

Přechody v tandemových článcích se dají elektricky spojovat dvěma způsoby, buďto sériově nebo paralelně. Sériové propojení je méně náročné, přechody se jednoduše propojí a vyvedou se elektrody. Pokud ale chceme zapojení paralelní, je potřeba zavést jednu elektrodu navíc z vrstvy mezi dvěma přechody.



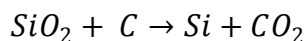
Obrázek 8: Systémy spojení u tandemových článků [32]

Sériové spojení má za následek sečtení napětí, které se tvoří v jednotlivých vrstvách, nicméně proud, který bude protékat je limitován nejtenčí podvrstvou. To znamená, že pro toto zapojení je ideální použít vrstvy, které budou mít podobnou produkci proudu při stejných podmínkách, aby neomezovala jedna druhou.

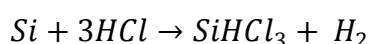
Paralelní zapojení má oproti tomu velkou nevýhodu ve výběru materiálu na středovou elektrodu. Tento materiál musí splňovat dvě hlavní kritéria. Musí být výborný vodič, aby zamezoval přenosovým ztrátám, a také musí být výborně propustný pro světlo, aby absorpční vrstva pod ní mohla dostatečně dobře přijímat dopadající fotony. [33] [34]

#### 2.4.2 Výroba křemíku v elektrotechnice

Křemíkové články jsou jedny z nejrozšířenějších fotovoltaických článků vůbec. Důvodem je velká dostupnost materiálu, podle některých zdrojů je jeho zastoupení v zemské kůře až 28%. Nicméně křemík se v přírodě nevyskytuje v čisté podobě, ale pouze ve sloučeninách, hlavně minerálech, jako je křemen, křemenný písek apod. Pro potřeby elektroniky je potřeba z oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) získat čistý křemík. Tento proces je popsán rovnicí:

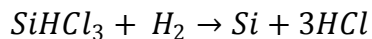


Oxid křemičitý je v reakci s uhlíkem redukován, při teplotě 1500 – 2000 °C na čistý křemík hutní kvality, jenž má asi 98% čistotu a používá se v metalurgii. Tento metalurgický křemík je pro potřeby elektrotechniky dále čistit, jelikož obsahuje množství nečistot a příměsí. Proces čištění se děje s reakcí s kyselinou chlorovodíkovou při 300 °C ve fluidním reaktoru:



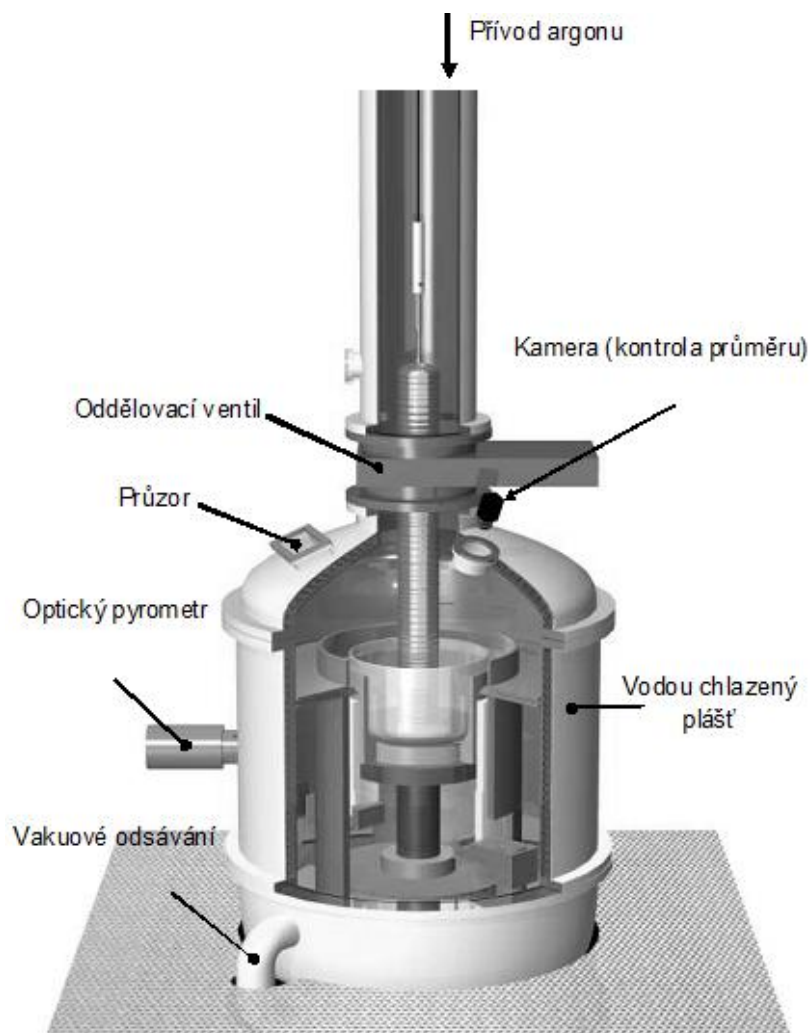
Při reakci s kyselinou chlorovodíkovou reagují nečistoty s chlórem a vytváření halidy ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ , apod.) Sloučenina  $\text{SiHCl}_3$  má teplotu varu 31,8 °C, destilací se potom

oddělí od ostatních a je odváděna pryč. Finálním krokem je separace samotného čistého křemíku ze sloučeniny, to se děje při reakci s vodíkem, při teplotě 1100 °C. Reakce probíhá ve vakuových komorách a křemík se začíná ukládat ve formě křemíkových tyčí, které dosahují průměru 15 – 20 cm. [20]



Články z monokrystalického křemíku jsou už na první pohled rozeznatelné svou tmavou barvou a uniformním vzhledem, kvůli vysoké čistotě obsaženého křemíku a stejné orientaci krystalů v mřížce. Vyrábějí se Czochralského metodou, kdy je v tažičce pomalu vytahován pevný krystal z kapalné taveniny.

Czochralského tažička je zařízení sloužící k výrobě monokrystalického křemíku z polykrystalické vsádky. Skládá se ze dvou komor, přičemž horní komora je od dolní oddělena ventilem, neboť ve spodní komoře je nutné vakuum.



Obrázek 9: Tažička pro výrobu monokrystalického křemíku [20]

Krystal se přichycuje na monokrystalické zárodečné zrno, jež udává výslednou krystalografickou orientaci. Běžně jsou používány orientace 100 a 111. [21]

Výstupem Czochralského metody je válcovitý ingot monokrystalického křemíku, který je následně nařezán na pláty s tloušťkou cca 5mm. K řezu je použita diamantová pila. Při řezání ingotu na kulové wafery je zužitkována asi polovina křemíku z ingotu. Zbytkový křemík je odplaven vodou. Pro užití v fotovoltaických modulech se často používá čtvercového nebo hexagonálního tvaru waferu, z důvodu úspory plochy. Tyto pravoúhlé články k sobě přilehnou lépe, než kulové.

Pro účely fotovoltaiky musí být wafery dotovány příměsí. Typicky jsou při dotování používány dva typy příměsí. Buďto trojmocný bór při tvorbě polovodiče typu P nebo pětímocný fosfor pro polovodič N typu. Dopování může být uskutečněno několika metodami. Nejrozšířenějšími z nich jsou pak difúze a iontová implementace. [37]

Difúze funguje na principu tepelného pohybu částic, které putují z oblasti vyšší koncentrace do oblasti s nižší koncentrací. Teploty pro difúzi u Si desek se pohybují v rozmezí 900 do 1200 °C, přičemž výsledná koncentrace příměsí závisí na množství faktorů, jako je teplota, čas, druh příměsí, koncentrace a použitá pracovní atmosféra. [38]

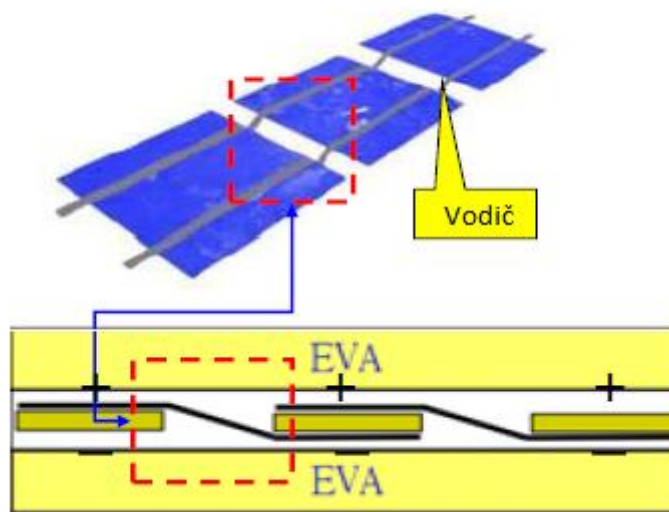
Iontová implementace je proces, při kterém je paprsek iontů příměsí směřován na terčík (křemíkový wafer). Ionizované částice příměsí jsou urychlovány a směřovány elektrickým a magnetickým polem, tak, aby výsledný iontový svazek byl vysoké čistoty a požadované energie. Ionty s dostatečnou kinetickou energií pronikají do struktury křemíku a jsou zde zabudovány. [39]

### **2.4.3 Proces výroby monokrystalických modulů**

Do procesu výroby vstupují jednotlivé články již nařezány na daný rozměr a požadovanou tloušťku od dodavatele. Na křemíkové články již byly napařeny kontaktní drátky např. metodou sítotisku. Výrobní proces modulů z článků je složen z několika důležitých kroků. Každý procesní krok je řízen intermí specifikací, ve které jsou udány požadované rozměry a tolerance, pro optické posouzení může být použito tzv. limitních vzorků, dle kterých je určeno zda ještě článek spadá do tolerance specifikace, nebo je již nevyhovující.

1. Třídění článků
2. Pájení
3. Laminace
4. Montáž
5. Testování

Tříděním článků je zajištěna uniformita vyrobeného modulu, jak z hlediska optických parametrů, tak z hlediska parametrů vizuálních. Na začátku výrobní linky jsou články prozkoumány CCD kamerou (AOI), která zjistí případné odlišnosti nebo defekty. Hlavní tři zkoumané hlediska jsou: Účinnost článku, barevná odlišnost a nalezení případné praskliny nebo lomu.



**Obrázek 10: Schéma zapojení článků ve strigu**

Články jsou následně seřazeny za sebe do tzv. stringů. Každý string je vlastně jeden soupec článků v modulu spájených dohromady. Stringy složené vedle sebe tvoří matici. Zapájená matrice je již hotový a funkční fotovoltaický modul, bez ochranných vrstev. Jednotlivé články jsou za sebou zapojeny v sérii, při provozu modulu se jejich napětí sčítají.

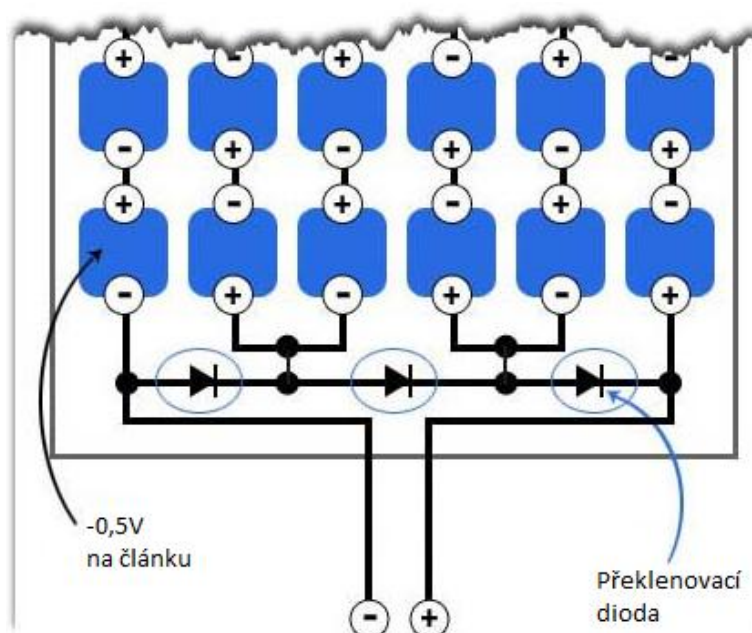
Pro použití modulů ve venkovním prostředí je potřeba články chránit před povětrnostními vlivy, jakými jsou vlhkost, či znečištění. Matrice článků je proto ochráněna vrstvou polymeru. Typicky je používám Ethylenvinylacetát, neboli EVA. Tento materiál je velmi vhodný, hlavně kvůli své teplotní stálosti a dobré světelné propustnosti. EVA je materiál termoplastický a po zahřátí mění nevratně své vlastnosti. Dodáván je ve formě rolí, na články je nanesen ve dvou vrstvách, jak lze vidět na Obr. 10. Na zadní straně budoucího modulu je spodní vrstva tvrdého plastu, chránící systém před venkovními vlivy a na horní straně je umístěno krycí sklo. Následně probíhá vytvrzení při 150 °C. Řez strukturou modulu lze vidět na Obr. 11.



**Obrázek 11: Řez strukturou modulu**

Pro snadnou manipulaci a instalaci u zákazníka musí být model opatřen rámem. Typicky jsou rámy hliníkové, složené z čtyř dílů slisovaných v jednotlivý celek. Při koncové montáži jsou moduly na střechách uchyceny právě za rámy.

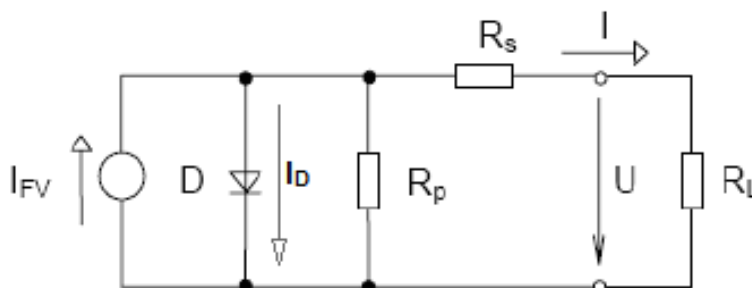
Na zadní straně plochy modulu je umístěna rozvodná skříňka, obsahující překlenovací diody. Diody slouží k ochraně modulu před nadměrným zatížením. Při částečném zastínění modulu se ze zakrytých článků stávají spotřebiče. Diody brání zakrytým článkům ve spotřebování energie, nadměrnému zahřívání a energetickým ztrátám.



**Obrázek 12: Schéma překlenovacích diod [40]**

#### 2.4.4 Parametry fotovoltaických článků

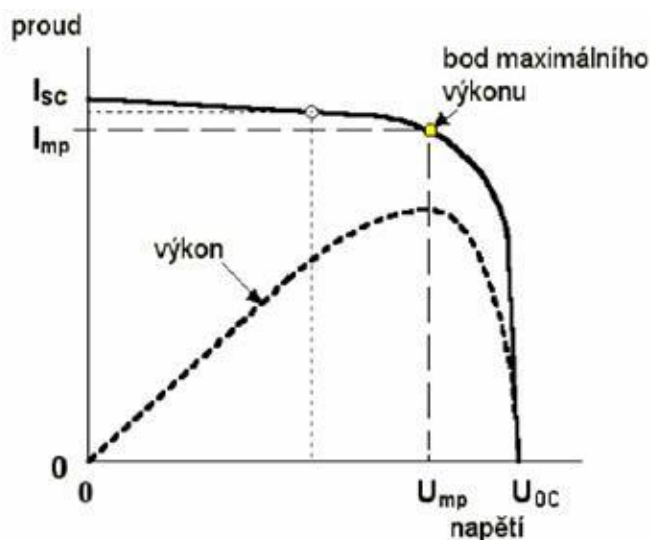
Každý fotovoltaický článek, má určité elektrické charakteristiky, v závislosti na materiálu, ze kterého je vyroben. Pro účely modelace bylo zavedeno náhradní schéma.



Obrázek 13: Náhradní schéma článku [11]

Osvětlení článku je v obrázku nahrazeno proudovým zdrojem  $I_{FV}$ , tento zdroj po osvětlení generuje určité množství proudu. U článků požadujeme tuto hodnotu co možná největší. Aby toho bylo dosaženo, je zřejmé, že musíme maximalizovat odpor  $R_p$  a minimalizovat sériový odpor  $R_s$ . Dioda v obvodu reprezentuje ztráty přechodu PN, vlivem rekombinací, v modelu je reprezentována úbytkem proudu. Odpor  $R_p$ , modeluje nedokonalosti v materiálu, tzv. svodové proudy a sériový odpor  $R_s$  nahrazuje odpor kontaktů, konektorů, vodičů apod.

Při měření elektrických vlastností modulů bývá často výsledek interpretován ve formě grafu závislosti proudu (výkonu) na napětí, tzv. I-U (P-U) charakteristika.



Obrázek 14: I-U charakteristika článku [12]

, zde  $U_{OC}$  znamená napětí mezi svorkami bez zátěže, neboli naprázdno,  $I_{SC}$  je proud při zkratovaných svorkách, tedy nakrátko. Při maximálním napětí je proud roven nule a naopak pokud při maximálním proudu neměříme žádné napětí. Tyto dvě veličiny jsou



krajní hodnoty grafu. Pro praktické využití je však dobré znát bod maximálního výkonu. Výkon obecně je dán součinem proudu a napětí, proto musíme najít takovou hodnotu proudu a napětí, kdy je jejich součin nejvyšší. [13]

$$P_{max} = I_{mp} * U_{mp} \quad (7)$$

Maximální napětí článku je  $U_{OC}$  a maximální proud je  $I_{SC}$ , nicméně, tyto veličiny jsou na sobě závislé a pokud se jedna zvyšuje, druhá klesá. Velikost závislosti změny proudu na napětí nám dává tzv. Fill factor. V grafu jej můžeme odhadnout podle tvaru křivky, čím je „pravoúhlejší“, tím je Fill factor vyšší. Nabývá hodnoty od 0 do 1, respektive od 0 do 100%.

$$FF = \frac{I_{mp} U_{mp}}{I_{SC} U_{OC}} \quad (8)$$

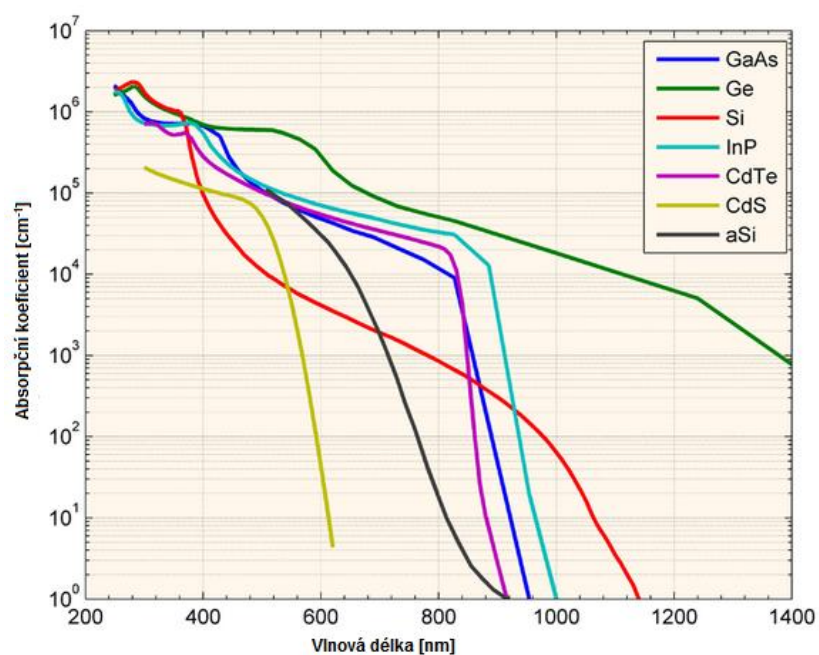
Důležitým parametrem charakterizujícím fotovoltaický článek je účinnost. Tento parametr nabývá hodnoty od 0 do 100%. Jeho hodnota nám udává, jak velká část výkonu dopadajícího záření je přeměněna na elektrickou energii. Rovnicí je účinnost popána takto:

$$P_{max} = V_{OC} * I_{SC} * FF \quad (9)$$

$$\eta = \frac{V_{OC} * I_{SC} * FF}{P_{in}} \quad (10)$$

[14] [15]

Důležitým parametrem pro tvorbu tenkých fotovoltaických článků je také absorpční koeficient. Je silně závislý na vlnové délce dopadajícího světla a udává vzdálenost, jakou pronikne světlo do materiálu, než je pohlceno. Polovodičové materiály mají v absorpční křivce velký zlom kolem oblasti s energií stejnou, jako je energie zakázaného pásu, neboť fotony s větší vlnovou délkou již nemají dostatek energie pro excitaci elektronu.



**Obrázek 15: Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce [17]**

Pro určení tloušťky materiálu, je ovšem potřeba znát hodnotu absorpční hloubky. Jedná se o převrácenou hodnotu absorpčního koeficientu a udává vzdálenost, kterou musí světlo v materiálu urazit, aby se jeho intenzita snížila na 36 % intenzity původní. [18]

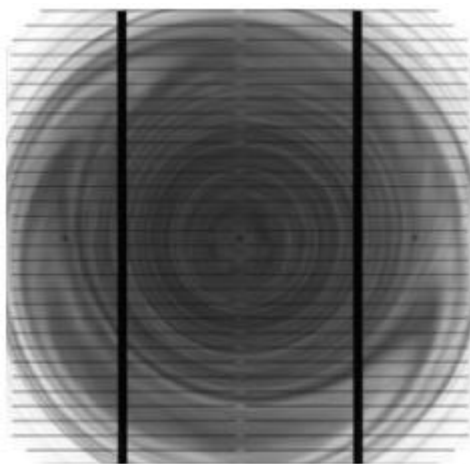
## 2.5 Defekty fotovoltaických molulů

Defekty fotovoltaických modulů a článků z monokrystalického křemíku vznikají ve dvou fázích výroby. Jednak při výrobě křemíku pro fotovoltaiku, druhak při zpracování tohoto křemíku. Defekty jsou tedy rozděleny do třech skupin:

- Materiálové defekty
- Procesní defekty
- Degradční procesy - PID

Příčinu materiálových defektů je třeba hledat v samotné struktuře křemíkového materiálu. Tento typ defektů vzniká již při výrobě waferu, tedy při tažení a uspořádávání krystalografické struktury. K typickým zástupcům patří tzv. Vírové defekty. Jedná se o defekt tvaru soustředných kružnic, které vycházejí od středu. Kružnice vznikají v důsledku injekce příměsí kyslíku do křemíku z důvodu rozpouštění křemenných nádob při rotačním pohybu během Czochralského metody. Při procesu lze nežádoucí kyslík přesunout na okraj křemíkového ingotu. Tento proces je ovlivněn zejména rychlostí rotace. Okraj křemíkového ingotu je oříznut a nečistoty jsou odstraněny.

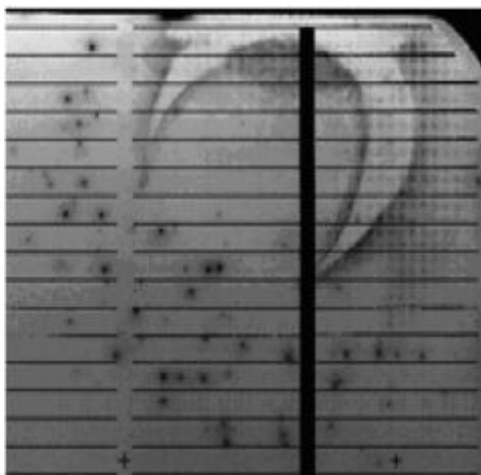
Kyslíková příměs v křemíku funguje jako centrum rekombinace párů elektron-díra, vytvořených fotony, dopadajících na plochu PN přechodu. Kvůli rekombinaci párů elektron díra v kyslíkových centrech se zkracuje doba života nosičů elektrického proudu. Zbytková energie je vyzářena ve formě tepla, což zapříčiňuje celkové snížení účinnosti článku. [41]



Obrázek 16: Vírový defekt [41]

Procesní defekty jsou nejčastěji způsobeny při zpracování křemíku a výrobě článků, nebo při transportu. Hlavními zástupci této skupiny jsou především defekty způsobeny mechanickým poškozením článků a také nehomogenita difúzní vrstvy.

Nehomogenita difúzní vrstvy vzniká během procesu difúze. Příčinou jsou nevyžádané nečistoty, které jsou spolu s částicemi fosforu rozptýleny na P-N přechodu.



**Obrázek 17: Nehomogenita difúzní vrstvy [41]**

Neodbornou manipulací s články může dojít k mechanickému poškození. Typicky k tomuto dochází zaviněním obsluhy, při počáteční fázi výroby nebo při závěrečném testování. Při poškrábání dochází ke zhmoždění vrchní vrstvy fotovoltaického článku. Do této skupiny defektů spadají např. Mikrotrhliny, škrábance nebo odlomené kusy článků. V závislosti na velikosti defektu, lze odhalit i pohým okem. Defekty jsou také dobře odhalitelné metodou elektroluniscence. [41]

Moduly, které jsou v provozu mohou být více, či méně ovlivněny prostředím, a to zejména teplotou, přítomností vlhkosti a také vnějšími jevy. Externí faktory jsou podstatnou příčinou degradací, se kterou je počítat po celou dobu životnosti navrženého systému. Nicméně pokud je odhalena jejich příčina, je možné moduly znovu uvést do původního stavu. Typicky se jedná o překážky blokující průchod slunečního světla na panel, příkladem může být strom, který po čase vyrostl a zakrývá tak části nebo celé moduly, případně také ptačí exkrementy, či nečistoty jako prach.

Moduly jsou od výroby laminovány v EVA fóliích, nicméně po čase teplotního namáhání se v laminaci mohou objevit trhliny nebo praskliny, jimiž může do modulu pronikat vlhkost. Vlhkost může pronikat také do „junction boxu“. Kontakt vlhkosti s metalickými částmi způsobuje korozi, která má za následek zvýšení odporu vodičů a v důsledku pak zvýšení sériového odporu celého modulu a tím snížení jeho účinnosti.[42]

### 2.5.1 PID degradace

Potenciálem indukovaná degradace, neboli PID je jev, který zasahuje množství typů modulů. Základní příčinou rozvoje PID je velký rozdíl potenciálů modulů ve stringu a teplota. Se vzrůstajícím počtem fotovoltaických systémů a jejich velikostí se problém PID stává čím dál více aktuálním. Při zvyšování počtu modulů ve stringu se zvyšuje rozdíl potenciálů mezi články a uzemněnými rámy modulů. Články jsou tak vystaveny vyššímu napětíovému rozdílu a jsou tak náchylnější k PID degradaci.

První zmínka o PIDu se datuje do roku 1970. Od té doby je tato problematika laboratorně zkoumána. V roce 2010 prezentovala společnost SOLON problematiku PID degradace a i další výrobci modulů se začali věnovat tomuto problému. Po roce 2012 se výrobci začali věnovat výrobě modulů PID rezistivních. Nicméně velké množství nerezistivních modulů již bylo ve světě nainstalováno. Výsledky testování naznačují, že 46 % namátkově testovaných modulů bylo pozitivně testováno na přítomnost PID degradace. Degradací procesy se v průměru začínají projevovat po 2 – 4 letech provozu a u FV systémů mohou způsobit pokles výkonu o 5 – 15 procent.[43]

Fenomén PID se objevuje poze u modulů obsahujících články z křemíku. Články mají při zapojení ve stringu na záporném konci vysoké napětí vůči hliníkovým rámcům, které jsou z bezpečnostních důvodů vždy uzemněny. Efekt PIDu se tedy projevuje tím více, čím blíže je modul k zápornému konci stringu, kdy je rozdíl potenciálů vyšší. V důsledku vysokého rozdílu potenciálů mohou sodné ionty z materiálů v modulu putovat ve směru elektrického pole mezi rámem a články. Zvýšení náboje (polarizace) modulu pak způsobuje ztráty a nepříznivě ovlivňuje výkonovou křivku.

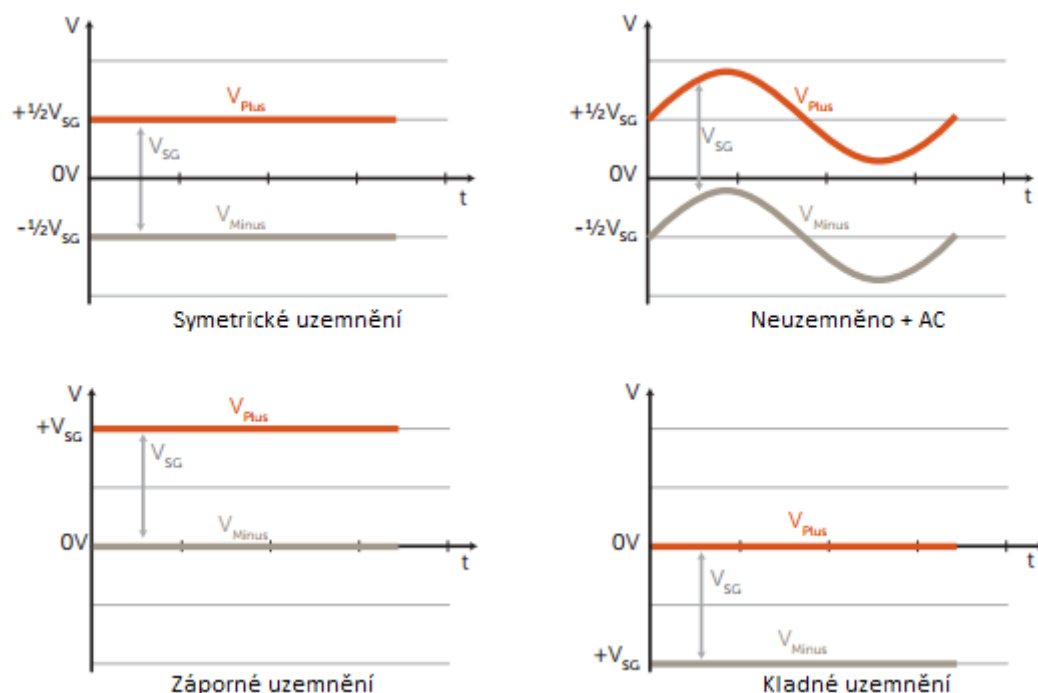
Mobilita iontů se zvyšuje s vzrůstající vlhkostí, teplotou a napětím. Testování ukazuje spojení pohyblivosti částic s teplotou i vlhkostí. Kontakt plochy modulu s povrchem článků způsobuje kapacitní vazbu v člancích, která má za následek zvýšení svodových proudů.

Existují 4 hlavní faktory vzniku PIDu u FV systémů:

- Prostředí
- Systém
- Modul
- Článek

Teplota a vlhkost ovlivňují FV systémy vlivy obou těchto faktorů jsou zahrnuty v testování modulů v laboratořích (UL, IEC). Nicméně tyto externí podmínky ovlivňují také rychlost PID degradace, ve smyslu zrychlení se zvyšující se teplotou a vlhkostí.

Nejdůležitějšími dopady v systému elektrárny je potenciál modulu, který závisí na pozici a také na způsobu, jakým je systém uzemněn. Existuje více typů zemnicí topologie v závislosti na zapojení inventoru v soustavě.



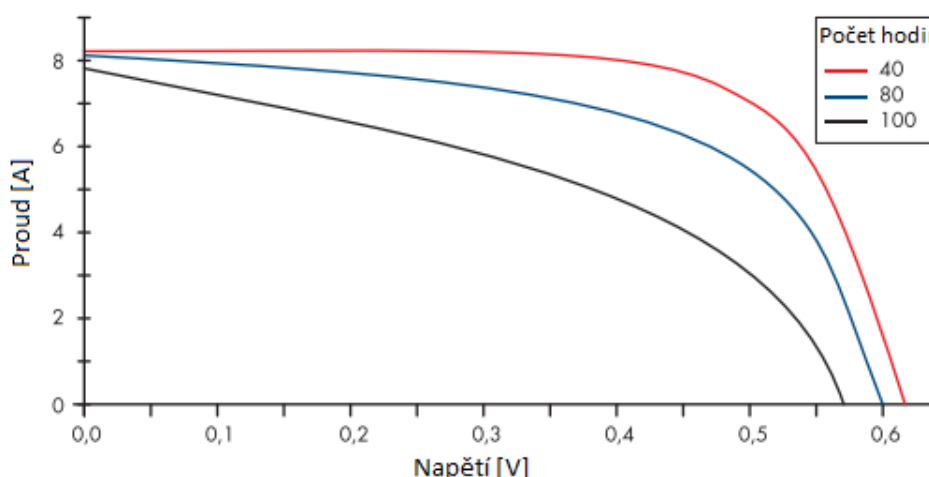
**Obrázek 18: Zemnicí topologie FV soustav [43]**

Na obrázku 19 jsou znázorněny čtyři základní typy zemnicí topologie u FV soustav. Napětí se tedy může výrazně lišit v závislosti na zapojení. Degradace PID je typicky způsobena záporným potenciálem, vhodným způsobem zapojení lze tak PID značně redukovat. [43]

Bylo prokázáno, že vliv na PID má také výběr vhodného krycího skla, laminačního materiálu a difúzní bariéry. Několik studií prokázalo, že vliv sodných iontů ze sodnovápenatého krycího by mohl kvůli velké mobilitě nosičů hrát podstatnou roli.

Různé typy laminovacích materiálů modulu mohou také výrazně ovlivňovat PID. Substituty EVA fólie dokázaly PID úspěšně potlačit, pravděpodobně příčinou rozdílné vodivosti materiálů. Octová kyselina přítomná vytvořená při průniku vlhkosti do struktury modulu zapříčiňuje naleptávání kovových částí přiléhajících na sklo.

Hlavním projevem PID degradace je snížení paralelního odporu a tím snížení celkového výkonu, který článek dodává. Zmenšujícím se paralelním odporem se zvyšují svodové proudy, které mají za následek „zploštění“ výkonové křivky, jak lze vidět na obr. 44. Snižuje se také hodnota napětí naprázdno a mírně proud nakrátko modulem. Celkově by se dalo říci, že se na křivce posouvá bod maximálního výkonu směrem k nižším hodnotám.



**Obrázek 19: Účinek PID na FV modul [44]**

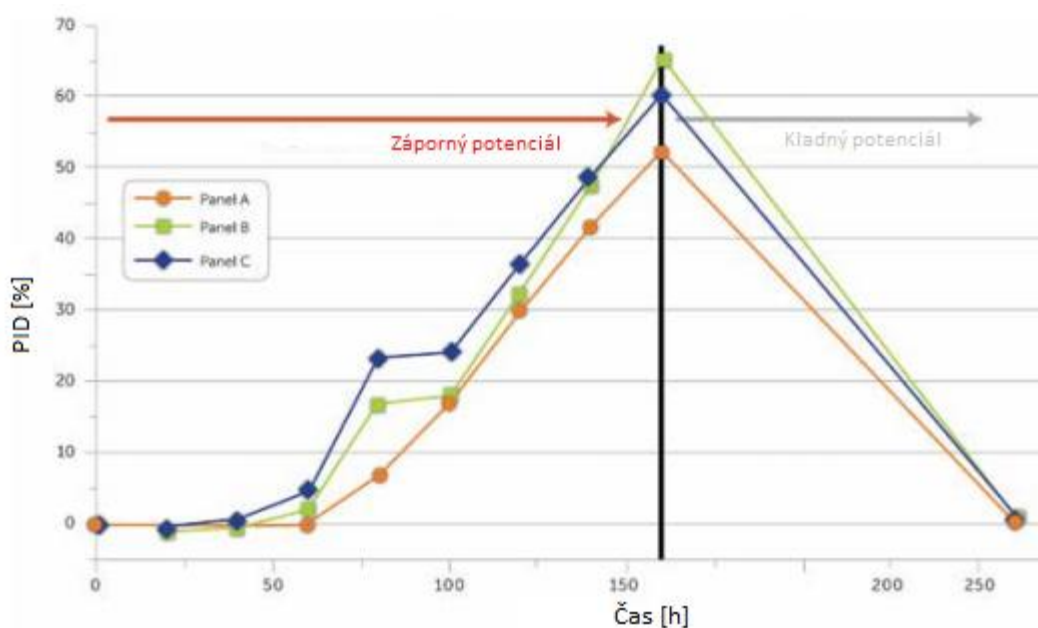
Znakem počínající degradace jsou nevysvětlitelné ztráty výtěžnosti FV systému. Pro měření paralelního odporu nebo bodu maximálního výkonu je potřeba složité vybavení, naopak jednoduše lze změřit napětí naprázdno. Podle samotné hodnoty  $V_{OC}$  nelze PID identifikovat, nicméně porovnáním napětí modulů v systému a srovnání pozic ve stringu lze odhadnout příčinu snížení výtěžnosti systému.

PID může být reversibilní nebo ireversibilní. Ireversibilní degradace je samozřejmě daleko závažnější. V látkách probíhá elektrochemická degradace a je zapotřebí okamžité odhalení a zmírnění účinků. Elektrochemická degradace v látkách vede ke korozi nebo k delaminaci modulů, nicméně tyto projevy byly zaznamenány hlavně v tenkovrstvých modulech a nejsou tak primárním problémem u technologií z krystalického křemíku.

Reversibilní PID je způsoben polarizací materiálu a byl objeven v roce 2005 firmou SunPower. Jedná se o nahromadění statického náboje na povrchu fotovoltaických modulů. Tento jev byl dále studován a nyní je obecně spojován s materiály z krystalického křemíku. Prvotní příčinou je difúze sodných iontů ze sodnovápenatého skla na povrch článků v důsledku působení elektrického pole. Rychlost migrace, jak již bylo řečeno, je ovlivněna nejvíce rozdílem potenciálů, teplotou a laminačním materiálem, přes který musí ionty difundovat k článkům.

Mechanismus, jakým působí sodné ionty na povrchu článků, není zatím přesně znám, nicméně existuje několik teorií. Koncentrace nabitých iontů na povrchu článku tvoří elektrické pole, které působí jako anti-pasivační vrstva, díky které se zvyšuje povrchová rekombinační rychlost. Další teorie popisuje, difúzi sodných atomů do struktury křemíku, které se následně chovají jako donory. Atomy donorů v P-typu článku se koncentrují v emitoru a tím neutralizují zápornou dotaci a snižují účinnost P-N přechodu a celého článku. [45][46]

Nezávisle na příčinách vzniku degradace je možné reverzibilní proces obrátit a moduly regenerovat. Testování ukázalo, že přiložením opačného potenciálu je možné otočit polarizační efekt a dostáhnout opět původního výkonu viz obr. 20.



**Obrázek 20: Studie degradace a regenerace krystalického modulu [43]**

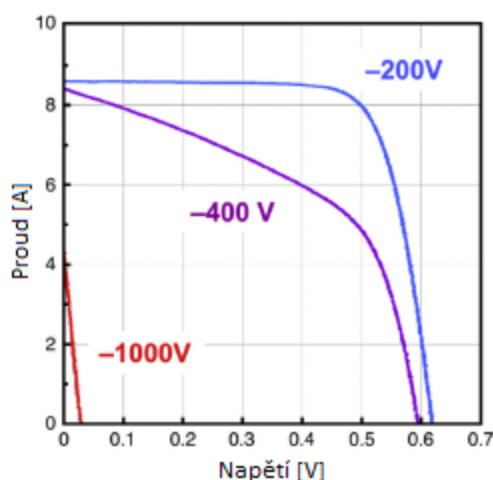
Takto byla reversibilní PID degradace zkoumána v několika studiích. Existuje vícero ukazatelů, dle kterých byla degradace zkoumána. A Masuda a kol. Ve své studii zkoumali vliv různých napětí a teplot v závislosti na časovém průběhu degradace. Použity byly fotovoltaické moduly bez rámu o velikosti 15,6x15,6 cm, na které byla elektrovodivou páskou připevněna hliníková elektroda. Soustavy byly umístěny v klimatické komoře s relativní vzušnou vlhkostí 2 % a teplotami 25 – 85 °C Na články byly přivedeny napětí v rozmezí od -100 V, -200 V, -400 V až po -1000 V, pomocí elektrického zdroje. Moduly byly analyzovány v průběhu a po dokončení degradace metodami SIMS a SCM a byly změřeny jejich I-V charakteristiky.



**Tabulka 1: Degradace modulů 24 h, 1000 V [47]**

$\vartheta$ [°C]	$I_{sc}$ [A]	$V_{oc}$ [V]	$FF$ [-]	$P_{max}$ [W]	$\eta$ [%]
25	8,57	0,61	0,72	3,8	15,6
45	8,67	0,62	0,69	3,71	15,2
65	6,54	0,1	0,25	0,17	0,7
85	6,05	0,09	0,24	0,12	0,5

V tabulce lze velmi dobře pozorovat změnu PID degradace v závislosti na teplotě modulu. Všechny testované moduly byly degradovány záporným napětím 1000 V. Teplota se měnila v rozmezí 25 – 85 °C. S rostoucí teplotou se míra degradace značně zvětšuje. Byl pozorován nárůst svodových proudů, které při teplotě 45 °C dosahovaly hodnoty 0,5  $\mu$ A, nicméně při zvýšení teploty na 90 °C se proud pohyboval až kolem 9  $\mu$ A.



**Obrázek 21: I-V charakteristiky modulu po PID degradaci [47]**

Na obrázku 22 vidíme závislost míry degradace na velikosti přiloženého napětí, po 24 h, při teplotě 85 °C. Graf I-V charakteristiky potvrdil, že moduly téměř nedegradují při rozdílu potenciálů menším, než 200 V. Viditelná degradace se projevila až při napětí 400 V, kdy paralelní odpor velmi poklesl. Výsledek jevu je z grafu jasně patrný velkým poklesem  $P_{MPP}$ .

Předchozími dvěma pokusy byl ověřen předpoklad potřeby jak vyšší teploty, tak rozdílu potenciálů většího, než 400 V, aby u modulu začala probíhat degradace.

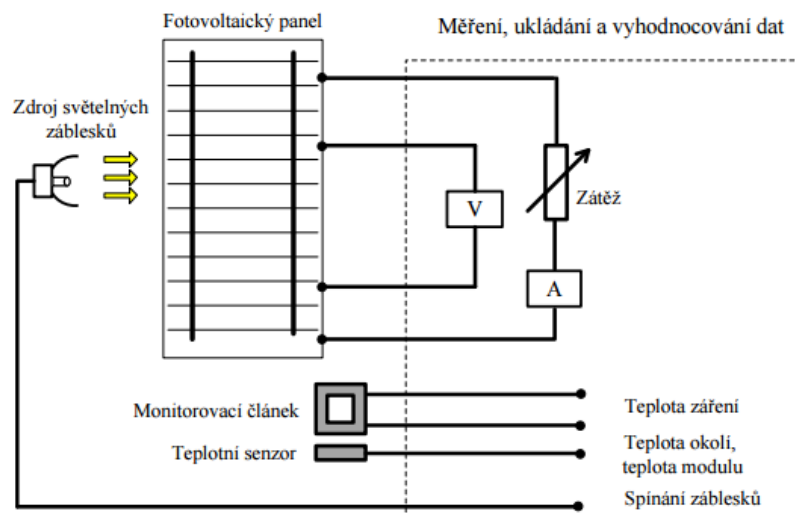
Po degradování byly moduly ponechány ve tmě, při pokojové teplotě, bez přiloženého napětí. Všechny moduly začaly při těchto podmínkách regenerovat, tedy se vracet do svého původního stavu před degradací, nicméně doba trvání kompletní regenerace trvá až 350 dní při počátečním poklesu výkonu o 80 %. [47]

## 2.6 Metody diagnostiky defektů

### 2.6.1 VA charakteristika (FLASH tester)

Měření fotovoltaických modulů Flash testerem patří k základním metodám stanovení elektrických parametrů každého modulu. Ve výrobě prochází tímto měření každý jednotlivý kus, aby byly stanoveny jeho parametry. Při testování mohou být také odhaleny jisté výrobní vady. Flash tester je navržen tak, aby se jeho spektrum co nejvíce blížilo spektru slunečního záření. Intenzita osvětlení článku nebo modulu musí být po celé jeho ploše homogenní a jeho hodnota je dána normou, záření na článek dopadá kolmo. Parametry FV prvků se měří při standardních podmínkách  $1000 \text{ W/m}^2$ , teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a AM 1,5 dle normy IEC 60904-9. Jako zdroj světla se používají nejčastěji MetalHalogenidové výbojky s životností 10 000 – 10 000 000 záblesků. Výstupem měření Flash testeru jsou elektrické parametry článku  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $P_{MAX}$ , FF, účinnost. Flash tester se skládá z několika částí:

- Zdroj záblesku generuje přesný impuls světla v pulzech, metodou single-pulse, kdy je měření provedeno při jednom záblesku, trvajícím 10 – 100 ms. Za tuto dobu se vykreslí celá I-V charakteristika. Druhou možností je metoda multiple-pulse. Toto měření je složeno z více krátkých záblesků, typicky 100 záblesků, kdy každý trvá 1 ms. Výsledná I-V charakteristika je pak složena z bodů měření při každém pulsu.
- Elektronická zátěž je automaticky regulovatelná tak, aby byla při testování proměřena celá I-V křivka.
- Senzor pro měření teploty zajišťuje dodržení požadavků normy pro standardní teplotu  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Monitorovací článek zajišťuje korekci pro optimální světelné ozáření [48]

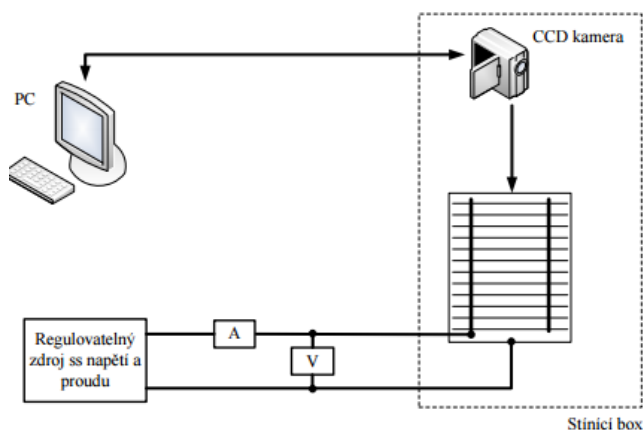


Obrázek 22: Blokové schéma Flash testeru [48]

### 2.6.2 Elektroluminiscence

Metoda elektroluminiscence pracuje na stejném principu, jako LED dioda. Článek nebo modul je napájen proudem, který způsobuje zářivou rekombinaci v P-N přechodu. V křemíkovém P-N přechodu probíhá Augerova rekombinace. Zářivá rekombinace nosičů (fotony) je zachycena CCD kamerou. Při použití tohoto typu testování je potřeba mít na článek již hotovou metalizaci. Měření probíhá ve tmě, aby nedocházelo ke zkreslení údajů vnějšími zdroji světla. Kamera je chlazená pro redukci termálního šumu.

Elektroluminence je populární metoda, užívaná také ve výrobě pro prvotní zjištění defektů. Obraz je složen ze světlejších a tmavších míst ve stupnici šedé. Světlejší (zářivější) místa na výsledném obrazu reprezentují vyšší proudovou hustotu. Tmavá místa značí poruchy ve struktuře článku. [48][49]



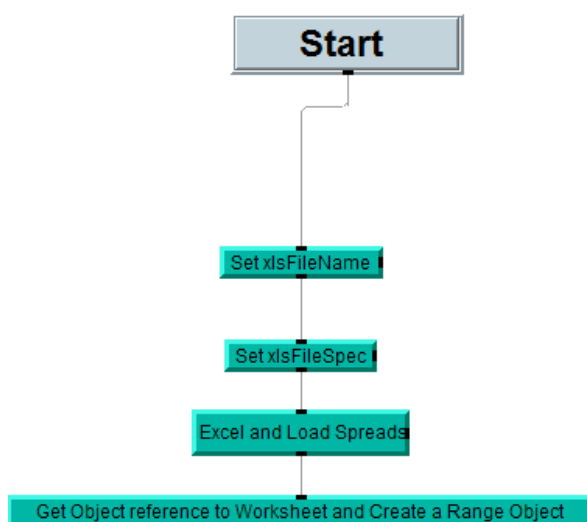
Obrázek 23: Blokové schéma měřicího pracoviště elektroluminiscence [48]

## 3 Praktická část

### 3.1 Agilent Vee – datalogger

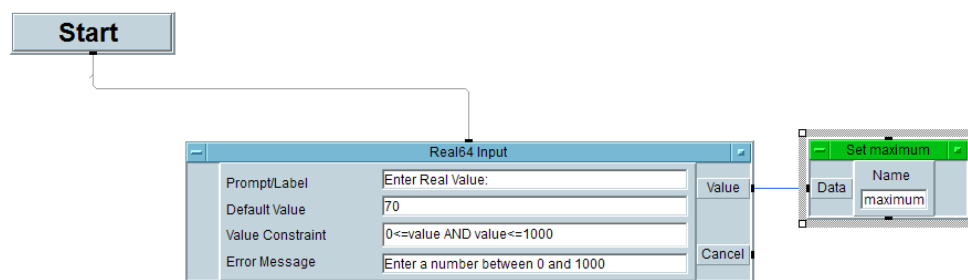
Keysight VEE (dříve Agilent VEE) je programovací a ovládací prostředí, umožňující vzdálenou práci a správu měřicích přístrojů Agilent. Slouží také pro správu dat nebo automatizaci měřicího procesu. Jedná se o grafické programovací prostředí, činnost nebo akce je zajištěna bloky objektů. Bloky z knihoven lze skládat za sebe a navazovat pro vytvoření požadované sekvence měření.

Program lze s nástroji spojit přes více rozhraní, jako je např. USB nebo LAN. Dle naprogramované sekvence je jím pak ovládán přístroj. Pro účely této diplomové práce byl k dispozici multimetr Agilent 34410A, bylo zapotřebí nastavit tento přístroj tak, aby plnil funkci tzv. dataloggeru, měřil a ukládal požadované data v definovaném časovém intervalu. Tato data jsou následně zapsána do Excelového souboru.



**Obrázek 24: Inicializace Excelového souboru**

Na obrázku 25 je zobrazeno schéma vytvoření a inicializace Excelového souboru pro pozdější zápis hodnot. Soubor je deklarován a spuštěn v prvním kroku po startu programu. Ve stejném čase je spuštěna deklarace proměnné „maximum“, která po zadání číselné hodnoty do dialogového okna nastaví počet cyklů měření.

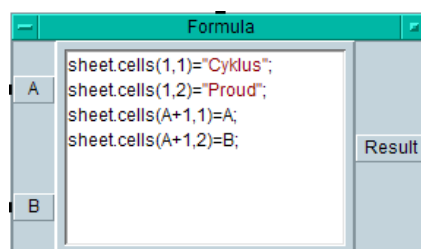


**Obrázek 25: Blok deklarace proměnné „maximum“**

Blok Real64 input vyvolá při startu programu dialogové okno pro zadání hodnoty o velikosti maximálně 64 bitů. Set maximum pak nastaví proměnnou na stanovenou hodnotu.

Zároveň s předchozími dvěma procesy je spuštěn vlastní proces měření dané veličiny. V tomto případě jde o stejnosměrný proud.

Jednotka „Until Break“ tvoří společně se členem „Break“ cyklus. Po celkovém dokončení jedné operace se cyklus opakuje tak dlouho, dokud není splněna podmínka pro spuštění členu Break. Měřicí cyklus je v tomto případě stanoven jako zpoždění kroku měření. Zpoždění je nastaveno v sekundách před spuštěním programu. Po uplynutí zadané doby je vyslán příkaz do multimetru a následně je provedeno měření DC proudu, jehož hodnota je zaspána, jako proměnná „x“ na výstupu bloku multimetru příkazem „Read text x“. Funkcí „Alphanumeric“ je skutečná naměřená hodnota proudu zobrazena Výstupem z Multimetru je reálná 64 bitová hodnota proudu, se kterou lze pak dále pracovat ve vytvořeném Excelovém souboru.



**Obrázek 26: Zápis dat do souboru**

Ve funkci „Formula“ jsou zpracovány hodnoty vstupů a dle podmínek uvnitř jsou data zapsána do souboru. Funkce sheet.cells udává počáteční souřadnice buňky, se kterou program pracuje. V prvních dvou řádcích jsou souřadnice nastaveny fixně, po každém spuštění jsou na začátek souboru do daných pozic vepsány údaje ze závorek (na obrázku červeně). A vstup slouží jako počítadlo proběhlých cyklů. K tomuto účelu je před vstupem zařazen tzv. Counter, který počet cyklů zobrazuje v číselné hodnotě tak, aby mohla být dále zpracována na vstupu dalšího bloku. Rovnice z obrázku způsobí, při navýšení cyklu o 1, posunutí aktivní buňky o jeden řádek dolů. Tím je zajištěno, že se hodnoty po

sobě následující nebudou přepisovat do jedné aktivní buňky, nýbrž budou řazeny pod sebe ve sloupci.

### 3.2 Měření sendvičové struktury analyzátozem Tettex

Volba použitých materiálů hraje ve struktuře fotovoltaického modulu velkou roli. Z hlediska PID degradace, kdy napříč strukturou působí elektrické pole, může být volba materiálu rozhodující. V dielektrickém analyzátoru Tettex 2830 byly zkoumány dva typy sendvičové struktury, s rozdílnou tloušťkou skla a EVA fólií.



Obrázek 27: Tettex 2914 analyzátor [50]

Struktury byly vloženy do stejnosměrného elektrického pole o intenzitě 1000 V mezi elektrodami s konstantní přitlačnou silou 4 kN. Zjišťován byl vliv teploty na velikost svodového proudu.

Tabulka 2: Srovnání průměrných svodových proudů v materiálu

Tlustší sklo + EVA		Tenčí sklo + EVA	
$\vartheta$ [°C]	$I$ [nA]	$\vartheta$ [°C]	$I$ [nA]
25	3,68	23,9	4,86
30	6,7	30,1	8,74
50	51,36	50	71,32
80	440	79,7	651,1

Z tabulky vyplývá, že svodový proud materiálů se zmenšuje, při zvyšující se tloušťce skla a teplotě. Hodnoty proudů při nízkých teplotách jsou pouze jednotky nA, téměř srovnatelné pro oba vzorky s EVA fólií.

Při teplotě 80 °C lze pozorovat značný nárůst svodového proudu. Vyšší teplota a přitlačná síla již způsobují zalaminování článku do EVA materiálu.

### 3.3 PID degradace fotovoltaického modulu

Praktická část se zabývá metodou měření degradace fotovoltaického modulu elektrickým polem. K dispozici byl polykrystalický modul značky Evergreen Solar ES-a-210-fa3, který již z předchozích zkušeností obsahoval články náchylné k PID degradaci. Modul se skládá ze šesti stringů, po 19-ti článcích, celkem tedy 114 článků. Modul je krytý sodnovápenatým sklem s antireflexní vrstvou, články jsou laminovány v EVA polymeru.



Obrázek 28: Modul Evergreen Solar

Parametry modulu udávané výrobcem:

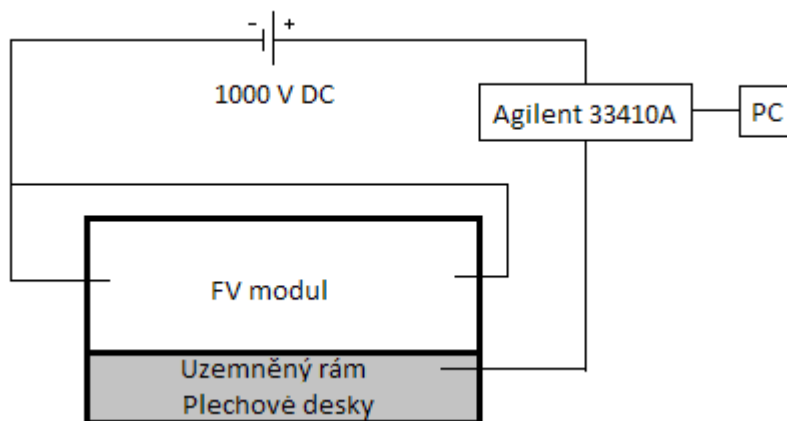
Tabulka 3: Parametry modulu Evergreen Solar

$P_{MPP}$ [W]	210
$U_{MPP}$ [V]	18,30
$I_{MPP}$ [A]	11,48
$U_{OC}$ [V]	22,80
$I_{SC}$ [A]	12,11

Data od výrobce jsou měřeny při standardních podmínkách.

Stanovení míry PID degradace bylo prováděno metodou měření svodového proudu v modulu s P krystalickými křemíkovými články. Dle teorie by se kvůli nahromadění iontů na povrchu článků měla snížit efektivita P-N polovodičového přechodu a poklesnout paralelní odpor. Poklesem paralelního odporu díky degradaci by mělo být docíleno zvýšení svodových proudů. PID degradace byla prováděna při pokojové teplotě ve tmavém prostředí. K dispozici byl vysokonapěťový zdroj stejnosměrného napětí. Rám modulu byl podložen vodivými deskami, na které bylo přiloženo stejnosměrné napětí 1000 V. Pro zajištění stejného potenciálu na článcích, byl kladný a záporný kontakt zkratován na

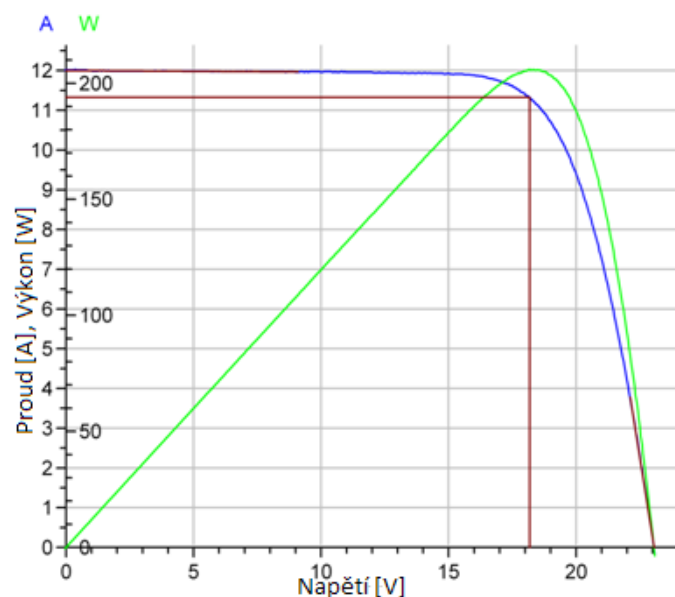
potenciál 0 V. Tím byl vytvořen podklad pro homogenní elektrické pole s intenzitou 1000 V.



**Obrázek 29: Schéma měřicího pracoviště**

Před začátkem degradace byly v atestované laboratoři změřeny skutečné elektrické parametry fotovoltaiického modulu, při standardních podmínkách. Veličiny byly naměřeny metodou FLASH test.





**Obrázek 30: V-A charakteristika modulu před degradací**

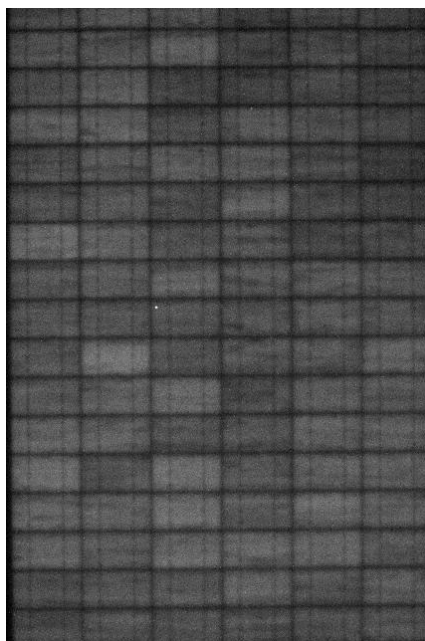
Výchozí veličiny modulu:

**Tabulka 4: Výchozí parametry modulu**

$I_{sc}$ [A]	12.004
$U_{oc}$ [V]	23.061
$P_{mpp}$ [W]	205.945
$U_{mpp}$ [V]	18.181
$I_{mpp}$ [A]	11.327
$R_{ser}$ [ $\Omega$ ]	0.2
$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]	246.3

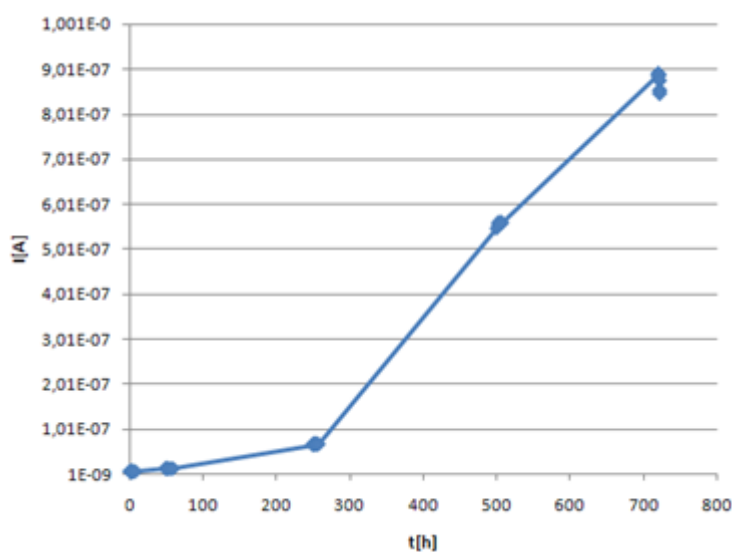
Z hodnot je patrné, že modul je ve velmi dobré kondici. Skutečné naměřené hodnoty se velmi blíží hodnotám udávaným výrobcem.

Před začátkem degradace byl modul zkoumán i metodou elektroluminiscence. Modul byl napájen proudem 2 A. Zde lze pozorovat mírnou neuniformitu článků, kdy některé jsou světlejší, než jiné. Jednotlivé články jsou nicméně bez vážných defektů. V modulu se nevyskytují články tmavé, zkratované, ani jinak defektní. Viz obrázek č. 32.



**Obrázek 31: Elektroluminiscenční test před zahájením PID degradace**

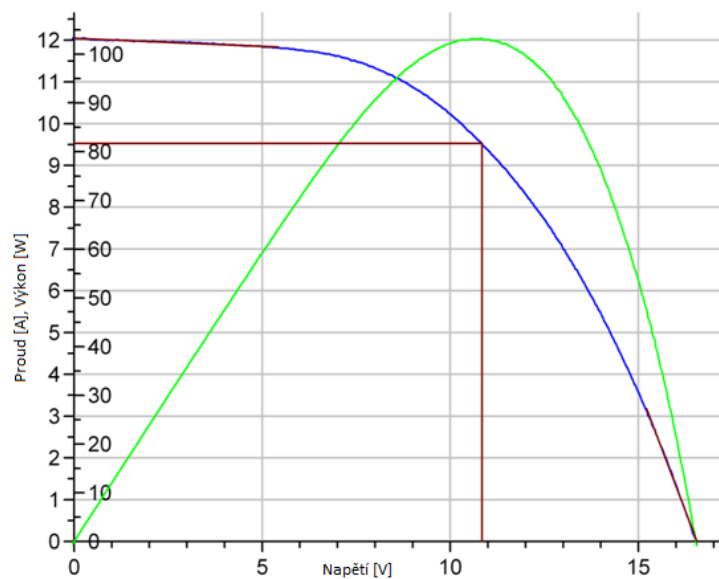
Hodnoty svodového proudu při probíhající degradaci byly měřeny a zaznamenávány průběžně



**Obrázek 32: Časový průběh degradace PID u modulu Evergreen**

Bylo prokázáno, že při PID degradaci značně narůstá svodový proud modulem. Nicméně při pokojové teplotě probíhá degradace velmi pomalu, pozvolný nárůst svodových proudů se děje v rámci jednotek dnů. Modul byl degradován po dobu 750 hodin, měřitelný proud na začátku procesu lze díky velmi nízkým hodnotám a považovat za nulový. S probíhající degradací se podstatně snižuje paralelní odpor, tím pádem proud tekoucí skrz strukturu modulu narůstá. Degradace modulu byla po 700 hodinách ukončena,

hondoty svodového prudu se již dále nezvyšovaly, články postihnuté PIDem jsou již plně degradovány.



**Obrázek 33: V-A charakteristika modulu Evergreen solar po PID degradaci**

Parametry modulu měřené metodou Flash test za standardních podmínek:

**Tabulka 5: Parametry modulu po degradaci**

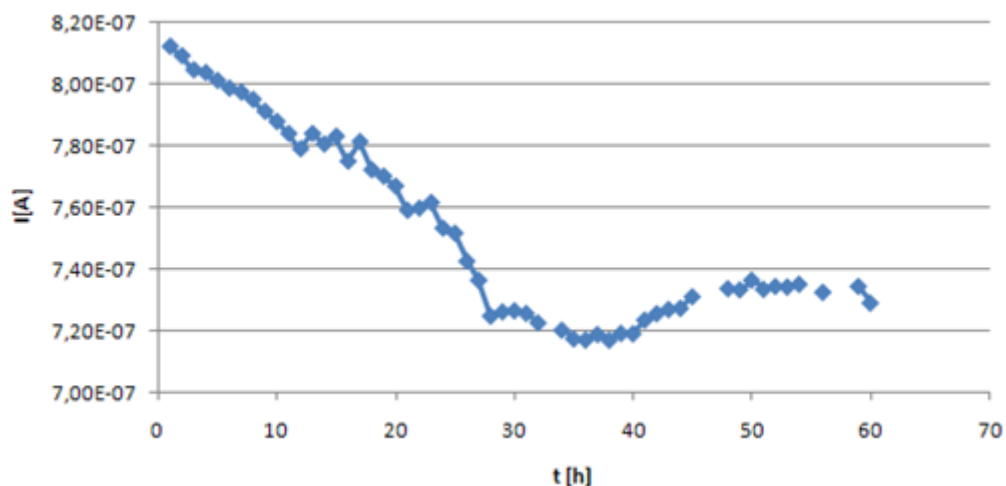
$I_{sc}$ [A]	12.044
$U_{oc}$ [V]	16.553
$P_{mpp}$ [W]	103.311
$U_{mpp}$ [V]	10.842
$I_{mpp}$ [A]	9.529
$R_{ser}$ [ $\Omega$ ]	0.4
$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]	26.1

Z grafu i přiložených hodnot vyčteme obrovský rozdíl Výkonu modulu. Z původních 206 W, byl zaznamenán pokles o 50 %, v důsledku velkého snížení napětí. Ukazatele potvrdily teoretické předpoklady PID degradace a byla potvrzena závislost stupně PID degradace na svodovém proudu modulu. Nahromaděním iontů na povrchu vznikají rekombinační centra nosičů elektrického náboje. Koncentrovaný náboj na povrchu článku vytváří elektrické pole, které snižuje odpor P-N přechodu a celkově pak snižuje paralelní odpor modulu. Tento odpor se snížil téměř na desetinu původní hodnoty



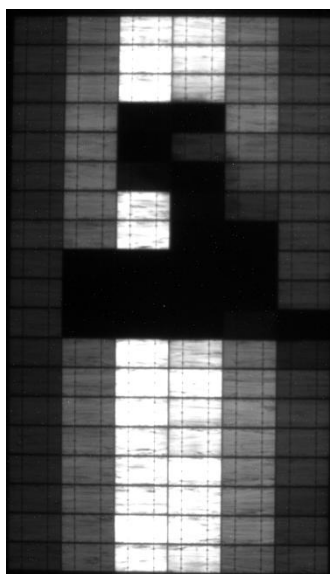
**Obrázek 34: Elektroluminescenční test po PID degradaci**

Po dokončení degradace byl proveden elektroluminescenční test za stejných podmínek, jako před degradací. Z celkového počtu 114 článků zůstalo vysvíceno pouze 18, zbývající byly až na několik výjimek úplně tmavých. Dle předpokladu měly být články postiženy PIDem náhodně rozloženy v modulu, nicméně na výsledku el. luminiscence jsou markantní dvě řady (dva stringy), které jsou degradací postihnuty výrazně méně, než zbytek modulu. Je možno uvažovat o několika příčinách tohoto jevu. Některé články jsou více PID rezistivní než jiné, mohlo by se tedy jednat o odlišnou dodávku článků při výrobě panelu. Druhou, pravděpodobnější možností je lokální útlum elektrického pole při degradaci, způsobený nerovnoměrným přtlakem plechu na krycí sklo. Chybu kontaktování článků můžeme vyloučit z důvodu neprojevení ztrát při měření V-A charakteristik.

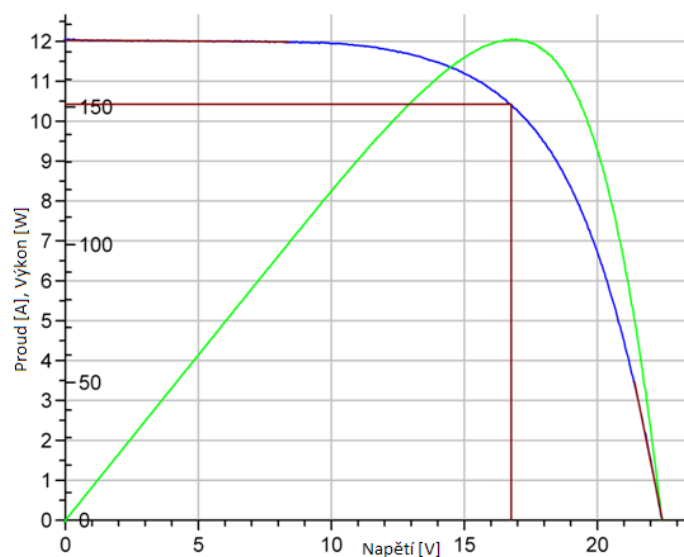


**Obrázek 35: Graf závislosti svodového proudu na čase regenerace**

Po dokončení degradace bylo elektrické pole přepólováno, na články byl připojen potenciál 1000 V a rám modulu byl uzemněn. Obrácené pole by mělo mít za následek migraci iontů z povrchu článků směrem zpět do skla. Velikost svodového proudu se při regeneraci dle předpokladu snižovala, se snižující se koncentrací iontů na povrchu článků. Po 40 hodinách regenerace nastalo ustálení proudu. Příčinou je pravděpodobně odpojení napěťového zdroje od modulu a tím přerušení procesu regenerace. Následně byl modul otestován metodou el. luminiscence.



**Obrázek 36: Luminiscenční metoda po částečné regeneraci**



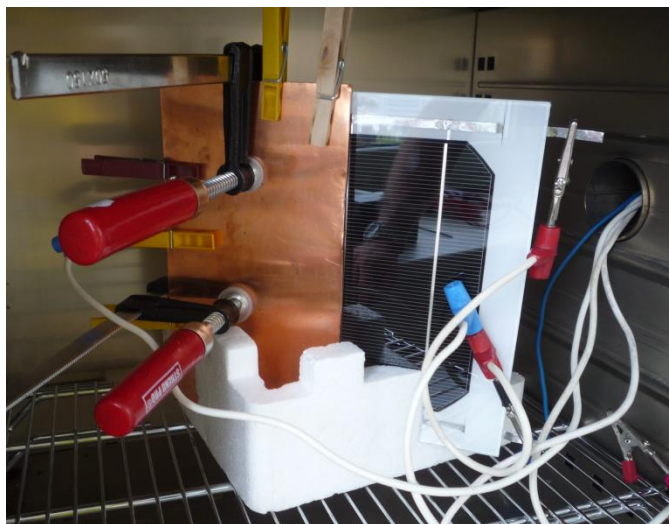
**Obrázek 37: A-V charakteristika modulu po částečné regeneraci**

$I_{sc}$ [A]	12.034
$U_{oc}$ [V]	22.445
$P_{mpp}$ [W]	174.667
$U_{mpp}$ [V]	16.761
$I_{mpp}$ [A]	10.421
$R_{ser}$ [ $\Omega$ ]	0.3
$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]	177.1

Regenerace panelu probíhala opět při pokojové teplotě v temném prostředí. Aplikovaný potenciál dokázal již po 40 hodinách částečně zregenerovat. Paralelní odpor stoupl na 177 Ohmů a výkon na 175 W. Z tohoto hlediska lze říci, že byl panel zregenerován o 35 %, z původních 50 % výkonu na 85 %.

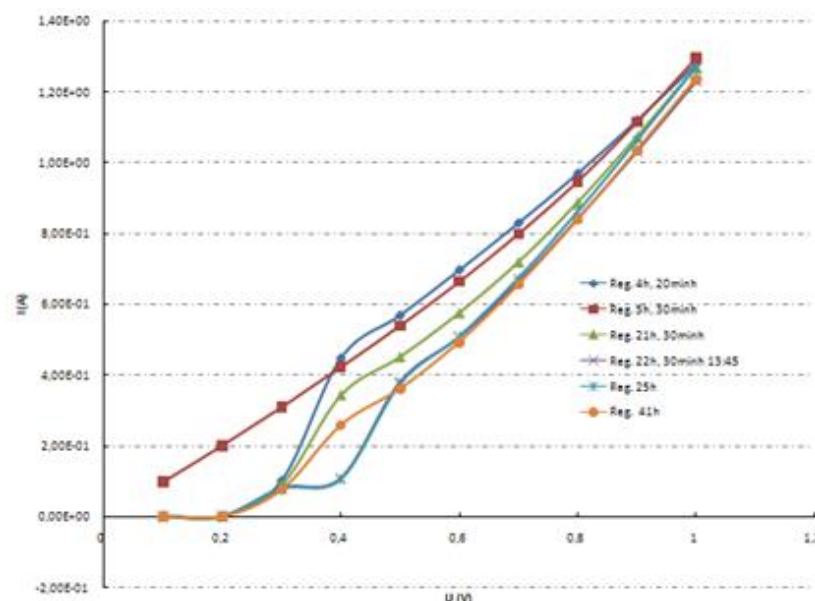
### 3.4 PID degradace mini-modulu

Dle výchozích předpokladů je PID degradace silně závislá jak na přiloženém elektrickém napětí, tak na teplotě. Testovací pracoviště sestává z klimatické komory, ve které je umístěn 6 palcový mini-modul vlastní výroby (spolupráci s firmou Fill Factory s.r.o v Rožnově pod Radhoštěm). Modul je z jedné poloviny zakryt měděnou deskou, na kterou je přivedeno 1000 V, druhá polovina zůstává odkrytá. Soustava je stažena dohromady pro co nejlepší přilnutí měděné desky k povrchu modulu, navíc jsou na některých místech slepeny dohromady vodivou oboustrannou páskou. Modul je vyroben z monokrystalického křemíku, bez dalších úprav. Laminován je v EVA fólii. Na vrchní straně leží krycí kalené sklo. Celková velikost modulu je 20x20 cm. Stejně, jako v předchozím případě, bude při měření probíhat elektroluminescenční test, V-A charakteristiky budou změřeny pomocí zdroje napětí a multimetru za tmy.



**Obrázek 38: Zapojení měřicího pracoviště pro PID degradaci**

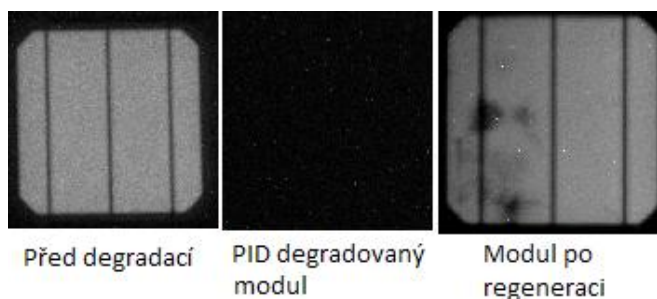
Metoda měření zkoumá změnu A-V charakteristiky degradovaného křemíkového modulu při regeneraci. Systém je uzavřen v klimatické komoře se stálou teplotou 70 °C. Výsledné charakteristiky jsou porovnány.



**Obrázek 39: V-A charakteristiky modulu při regeneraci za temna**

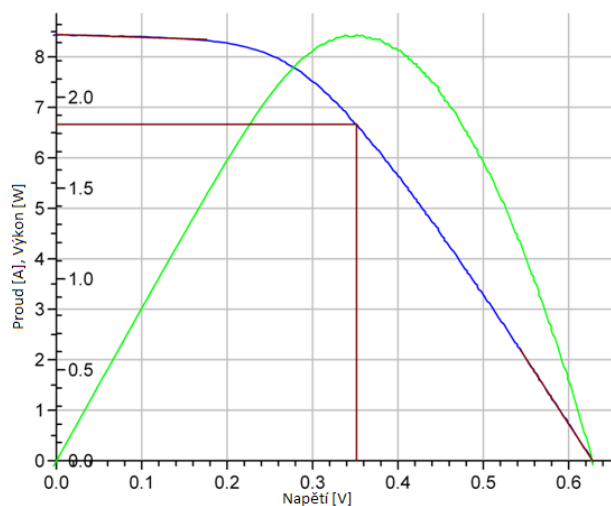
Při působení teploty probíhá PID regenerace v modulu značně rychleji, než při pokojové teplotě. Nosičům elektrického náboje je dodána termální energie a jejich mobilita roste, tím se doba potřebná pro regeneraci zkracuje. V této kapitole byl degradovaný modul regenerován stejnosměrným napětím 1000 po dobu 41 hodin při teplotě 70 °C. V určitých časech byly proměřeny V-A charakteristiky modulu v I. kvadrantu. Charakteristiky byly porovnány na obr. 40. Výstup V-A charakteristiky v tmavém prostředí by měl mít tvar exponenciály s prahovým napětím kolem 0,6 V a odpovídat charakteristice křemíkové polovodičové diody.

Elektroluminescenční testování ukazuje rozdíl mezi modulem před degradací a po regeneraci. Dle dosažených výsledků se nepodařilo modul regenerovat zcela. Při testování bylo zjištěno, že došlo ke snížení paralelního odporu téměř k nulové hodnotě. V-A charakteristika má téměř lineární tvar, modul se tedy chová jako odporový člen. Při postupné regeneraci se začíná utvářet charakteristický exponenciální tvar křivky.

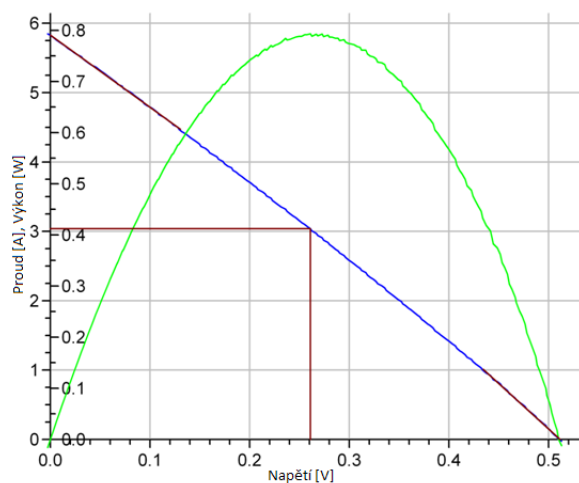


**Obrázek 40: Srovnání výsledků elektroluminiscence modulu**

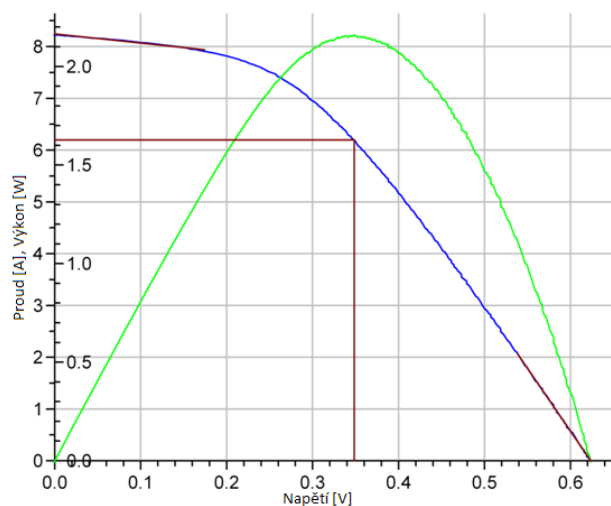




**Obrázek 41: A-V charakteristika před degradací – Flash tester**



**Obrázek 42: A-V charakteristika po degradaci – Flash tester**



**Obrázek 43: A-V charakteristika po regeneraci – Flash tester**

**Tabulka 6: Srovnání hodnot modulu během degradace a regenerace**

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$\vartheta$ [°C]	25.0	25.0	25.0	25.0
$G_{(i)}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	1.0	1.0	1,0	1.0
$I_{sc}$ [A]	8.446	5.830	8,061	8.244
$U_{oc}$ [V]	0.628	0.512	0,623	0.624
$Eff.$ [%]	5,86	1.98	5,22	5.40
$FF$ [%]	44.16	26.59	41,52	41.99
$P_{mpp}$ [W]	2.342	0.793	2,087	2.159
$U_{mpp}$ [V]	0.352	0.261	0,340	0.349
$I_{mpp}$ [A]	6.662	3.039	6,145	6.194
$R_{ser}$ [Ω]	0.0	0.1	0	0.0
$R_{sh}$ [Ω]	1,7	0.1	0,4	0.6

1 – modul před degradací, 2 – degradovaný modul, 3 – 22 h regenerace, 4 – 41 h regenerace.

Vlivem degradace došlo u modulu ke zvýšení sériového odporu a tím ke snížení hodnot proudu modulem, spolu s poklesem paralelního odporu narostl svodový proud. Rapidní snížení proudu nakrátko je zapříčiněno rozsáhlou degradací celé poloviny modulu. Zkrat způsobený PIDem způsobil, že celý modul byl při elektroluminiscenci tmavý. Celková účinnost modulu se snížila o 67 %.

Již po 22 hodinách regenerace je velmi dobře patrné zlepšení parametrů modulu. Díky snížení koncentrace alkalických iontů na povrchu článku postupně stoupá paralelní odpor a články již dosahuje 90 % původní účinnosti. Po dalších 19 hodinách se parametry zvyšují pouze nepatrně. Dle výsledku elektroluminiscence byl modul téměř kompletně regenerován.

## 4 Závěr

Diplomová práce se zabývala PID degradací fotovoltaických modulů. Práce je členěna na teoretickou část, jež popisuje fyzikální principy přeměny Slunečního záření na elektrickou energii, charakterizuje elektrické parametry fotovoltaických modulů a zabývá se výrobou fotovoltaických článků a modulů a rozebírá problematiku PID degradace.

Praktická část sestává ze tří pododdílů. Zkoumána byla možnost detekce PID metodou měření svodového proudu v modulu Evergreen Solar při probíhající degradaci a změny proudu při následné regeneraci při aplikaci homogenního elektrického pole o intenzitě 1000 V. Experiment probíhal při pokojové teplotě v temné místnosti po dobu několika dní, data byla sbírána automatizovaně v daných intervalech, za použití multimetru řízeného počítačovým programem. Vlivem probíhající degradace se snižoval paralelní odpor modulu, což zapříčinilo zvýšení proudu tekoucího skrz strukturu P-N přechodu. Stupeň degradace a následné regenerace byl ověřen metodou elektroluminiscence.

Dále se práce věnovala změnám parametrů 6 palcového experimentálního fotovoltaického modulu při regeneraci. Modul byl degradován v klimatické komoře elektrickým polem o intenzitě 1000 V při teplotě 70 °C. Bylo zjištěno, že regenerace při vyšší teplotě probíhá se zvýšenou rychlostí, pravděpodobně díky větší mobilitě iontů, které se díky elektrickému poli přesouvají z povrchu článku. Za dobu 40 hodin byl modul téměř kompletně regenerován s výkonem více než 92 % ve srovnání s původní hodnotou. Ve výsledku elektroluminiscence byly na modulu i po regeneraci patrné tmavé oblasti, které mohou být případně způsobeny nevratnou degradací.

## 5 Seznam zkratek

SIMS	Scientific Image Manipulation system
SCM	Scanning Capacitance Microscopy
$U_{OC}$	Napětí naprázdno
$I_{SC}$	Proud nakrátko
$P_{MPP} (P_{MAX})$	Bod maximálního výkonu
$U_{MPP}$	Napětí v bodě maximálního výkonu
$I_{MPP}$	Proud v bodě maximálního výkonu
$G_i$	Intenzita osvětlení
$R_{ser} (R_s)$	Sériový odpor
$R_{sh} (R_p)$	Paralelní odpor
String	Sériově propojené fotovoltaické moduly

## 6 Zdroje

- [1] *TRUNKY* [online]. 2000 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://http://www.trunky.cz/bp/fypolo/4.htm>
- [2] MUSIL, Vladislav. *Elektronické součástky*. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1996, 222 s. ISBN 80-214-0821-9.
- [3] ČEZ: *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [3] <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm>
- [4] *Basic electronic tutorials* [online]. 13. 12. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode\\_2.html](http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html)
- [5] *Micronix: Solární panely* [online]. 2013 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.micronix.cz/data/cz/upload\\_fck/image/solarix/spektrum.png](http://www.micronix.cz/data/cz/upload_fck/image/solarix/spektrum.png)
- [6] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013, 254 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [7] *The physics hyperbook: Photoelectric effect* [online]. 1998, 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://physics.info/photoelectric>
- [8] *Cidly.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.cidly.cz/\\_obchody/zkouska.shop5.cz/soubory/mag1.jpg](http://www.cidly.cz/_obchody/zkouska.shop5.cz/soubory/mag1.jpg)
- [9] Ostravská univerzita: Fotoelektrický jev. *Fotoelektrický jev* [online]. 2004, 2006 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://artemis.osu.cz/mm fyz/qm/qm\\_1\\_3.htm](http://artemis.osu.cz/mm fyz/qm/qm_1_3.htm)
- [10] *TZB.info: Fotovoltaika* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika>
- [11] *TZB.info* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0035/003553o3.gif>
- [12] *Fotovoltaika: Petr Slatinský* [online]. 2008 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.slatinsky.eu/img/clanky/originals/graf-1844.jpg>
- [13] *Green Rhino Energy Ltd.* [online]. 2013 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv\\_electronics.php](http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_electronics.php)
- [14] *PVeducation.org: Fill Factor* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>

- [16] *University of south carolina: Engeneering and computing* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [15] <http://www.ee.sc.edu/personal/faculty/simin/ELCT566/21%20Solar%20Cells%20II.pdf>
- [17] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. *Alternativní zdroje energie* [online]. Brno, 2006 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=27102](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=27102)
- [18] *PVeducation: Absorption coefficient* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-coefficient>
- [19] *PVeducation: Absorption depth* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-depth>
- [20] <https://www.theguardian.com/environment/2016/feb/04/morocco-to-switch-on-first-phase-of-worlds-largest-solar-plant>
- [21] *Materiálová věda: Kde se bere monokrystalický křemík?* [online]. 2011 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://materialovaveda.blogspot.cz/2011/07/kde-se-bere-monokrystalicky-kremik.html>
- [22] PÁLENÍČEK, M. *Detekce a studium krystalových defektů v Si deskách pro elektroniku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Urbánek, Ph.D.
- [23] *Jaycar Electronics* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.jaycar.com.au/Ecotech/Solar-Power/Monocrystalline-Panels/Powertech-Monocrystalline-Solar-Panel-90W/p/ZM9086>
- [24] *Jaycar Electronics* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.jaycar.com.au/Ecotech/Solar-Power/Monocrystalline-Panels/Powertech-Monocrystalline-Solar-Panel-90W/p/ZM9086>
- [25] Which solar panel is the best. *ENERGY INFORMATIVE* [online]. 2015, 2015-05-18 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film>
- [26] *GreenTechnology.com: Monocrystallice solar cells* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://exploringgreentechnology.com/solar-energy/technology/monocrystalline-solar-cells/>
- [27] *123RF: Stock Photo* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.123rf.com/photo\\_27734440\\_polycrystalline-solar-cell-3x6-for-diy-solar-panel-isolated-on-white-background.html](http://www.123rf.com/photo_27734440_polycrystalline-solar-cell-3x6-for-diy-solar-panel-isolated-on-white-background.html)

- [28] *Solar facts and advice: What is amorphous silicon* [online]. 2013 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.123rf.com/photo\\_27734440\\_polycrystalline-solar-cell-http://www.solar-facts-and-advice.com/amorphous-silicon.html](http://www.123rf.com/photo_27734440_polycrystalline-solar-cell-http://www.solar-facts-and-advice.com/amorphous-silicon.html)
- [29] *TZBinfo: Fotovoltaika druhé a třetí generace* [online]. 2006 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace>
- [30] BOOTHROYD, Peter a Xuân Nam PHẠM. *Socioeconomic renovation in Viet Nam: the origin, evolution, and impact of doi moi*. Singapore: Institute of Southeast Asian Studies, 2000, xv, 174 p.
- [31] BOSCHLOO, Gerrit a Anders HAGFELDT. Characteristics of the Iodide/Triiodide Redox Mediator in Dye-Sensitized Solar Cells. *Accounts of Chemical Research* [online]. 2009, **42**(11): 1819-1826 [cit. 2015-12-16]. DOI: 10.1021/ar900138m. ISSN 0001-4842. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ar900138m>
- [32] *INTECH: Open science open minds* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/source/html/37686/media/image4.pngC:\Users\radimbaklik\Desktop\Diplomovka\The Elder Scrolls - CIGS\CIGS Photovaltaic Technology> [online]. 2010 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://astro1.panet.utoledo.edu/~relling2/teach/archives/6980.4400.2011\20110324\\_PHYS\\_6980\\_4400.pdf](http://astro1.panet.utoledo.edu/~relling2/teach/archives/6980.4400.2011\20110324_PHYS_6980_4400.pdf)
- [33] FARAJ, M.G., K. IBRAHIM a A. SALHIN. Effects of Ga concentration on structural and electrical properties of screen printed-CIGS absorber layers on polyethylene terephthalate. *Materials Science in Semiconductor Processing* [online]. 2012, **15**(2): 206-213 [cit. 2015-12-16]. DOI: 10.1016/j.mssp.2012.03.002. ISSN 13698001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369800112000248>
- [34] INGUANTA, Rosalinda, Patrizia LIVRERI, Salvatore PIAZZA a Carmelo SUNSERI. Fabrication and Photoelectrochemical Behavior of Ordered CIGS Nanowire Arrays for Application in Solar Cells. *Electrochemical and Solid-State Letters* [online]. 2010, **13**(3): K22- [cit. 2015-12-16]. DOI: 10.1149/1.3274126. ISSN 10990062. Dostupné z: <http://esl.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.3274126>
- [35] MOUSAVI, S.H., T.S. MÜLLER, R. KAROS a P.W. DE OLIVEIRA. Faster synthesis of CIGS nanoparticles using a modified solvothermal method. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2016, **659**: 178-183 [cit. 2015-12-16]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.10.261. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838815315176>

- [36] KREBS, Frederik C., Markus HÖSEL, Michael CORAZZA, et al. Freely available OPV-The fast way to progress. *Energy Technology* [online]. 2013, 1(7), 378-381 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.1002/ente.201300057. ISSN 21944288. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/ente.201300057http://www.madehow.com/Volume-1/Solar-Cell.html>
- [37] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [38] How do Solar panel work? *SolarQuotes* [online]. 2015 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.solarquotes.com.au/img/bypass-diodes2.jpg>
- [39] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnosticke metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. 92 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [40] Degradation and failure mode. *PVEducation.org* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/degradation-and-failure-mode>
- [41] Understanding Potential Induced degradation. *Advanced Energy* [online]. USA: Advanced Energy Industries Inc [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White\\_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf](http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf)
- [42] PID problem and how to solve it. *SMA* [online]. USA: SMA [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://files.sma.de/dl/7418/PID-PVOBox-TI-en-10.pdf>
- [43] PINGEL, S., O. FRANK, M. WINKLER, S. DARYAN, T. GEIPEL, H. HOEHNE a J. BERGHOLD. Potential Induced Degradation of solar cells and panels. In: *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* [online]. IEEE, 2010, s. 002817-002822 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616823. ISBN 978-1-4244-5890-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5616823> S Koch, et al, Polarization Effects and testing crystalline silicon cells, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference Exhibition, 5-8 Sep. 2011, Hamburg, Germany
- [44] MASUDA, Atsushi, Minoru AKITOMI, Masanao INOUE, Keizo OKUWAKI, Atsuo OKUGAWA, Kiyoshi UENO, Toshiharu YAMAZAKI a Kohjiro HARA. Microscopic aspects of potential-induced degradation phenomena



and their recovery processes for p-type crystalline Si photovoltaic modules. *Current Applied Physics* [online]. 2016, **16**(12), 1659-1665 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.1016/j.cap.2016.10.001. ISSN 15671739. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1567173916302723> KLADIVA, Roman Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Elektrotechnologie, 2013. 98 s. Vedoucí práce byl Ing. Roman Gvritishvili

- [45] Electroluminescence. *PVEducation.org* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/electroluminescence/>
- [46] 2914 - Solid Insulation Test Cell. *Haefely Hipotronics* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/2914-solid-test-cell/>

## 7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Pásové modely pevných látek [1] .....	10
Obrázek 2: Spektrum záření Slunce [5].....	12
Obrázek 3: Spektrum elektromagnetického záření [8] .....	14
Obrázek 4: Modul z monokrystalického křemíku [23].....	15
Obrázek 5: Článek z polykrystalického křemíku [26].....	16
Obrázek 6: Složení vrstev Fotovoltaického článku CdTe/CdS [28].....	17
Obrázek 7: Tandemový fotovoltaický článek[31] .....	18
Obrázek 8: Systémy spojení u tandemových článků [32] .....	19
Obrázek 9: Tažička pro výrobu monokrystalického křemíku [20].....	20
Obrázek 10: Schéma zapojení článků ve strigu .....	22
Obrázek 11: Řez strukturou modulu.....	23
Obrázek 12: Schéma překlenovacích diod [40].....	23
Obrázek 13: Náhradní schéma článku [11] .....	24
Obrázek 14: I-U charakteristika článku [12] .....	24
Obrázek 15: Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce [17].....	26
Obrázek 16: Vírový defekt [41].....	27
Obrázek 17: Nehomogenita dufúzní vrstvy [41] .....	28
Obrázek 18: Zemní topologie FV soustav [43] .....	30
Obrázek 19: Účinek PID na FV modul [44].....	31
Obrázek 20: Studie degradace a regenerace krystalického modulu [43].....	32
Obrázek 21: I-V charakteristiky modulu po PID degradaci [47] .....	33
Obrázek 22: Blokové schéma Flash testeru [48] .....	35
Obrázek 23: Blokové schéma měřicího pracoviště elektroluminiscence [48].....	35
Obrázek 24: Inicializace Excelového souboru.....	36
Obrázek 25: Blok deklarace proměnné „maximum“ .....	37
Obrázek 26: Zápis dat do souboru .....	37
Obrázek 27: Tettex 2914 analyzátor [50] .....	38

Obrázek 28: Modul Evergreen Solar .....	39
Obrázek 29: Schéma měřicího pracoviště .....	40
Obrázek 30: V-A charakteristika modulu před degradací .....	41
Obrázek 31: Elektroluminiscenční test před zahájením PID degradace.....	42
Obrázek 32: Časový průběh degradace PID u modulu Evergreen .....	42
Obrázek 33: V-A charakteristika modulu Evergreen solar po PID degradaci.....	43
Obrázek 34: Elektroluminiscenční test po PID degradaci .....	44
Obrázek 35: Graf závislosti svodového proudu na čase regenerace.....	45
Obrázek 36: Luminiscenční metoda po částečné regeneraci .....	45
Obrázek 37: A-V charakteristika modulu po částečné regeneraci.....	46
Obrázek 38: Zapojení měřicího pracoviště pro PID degradaci .....	47
Obrázek 39: V-A charakteristiky modulu při regeneraci za temna .....	48
Obrázek 40: Srovnání výsledků elektroluminiscence modulu .....	48
Obrázek 41: A-V charakteristika před degradací – Flash tester .....	49
Obrázek 42: A-V charakteristika po degradaci – Flash tester .....	49
Obrázek 43: A-V charakteristika po regeneraci – Flash tester .....	49

## 8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Degradace modulů 24 h, 1000 V [47] .....	33
Tabulka 2: Srovnání průměrných svodových proudů v materiálu.....	38
Tabulka 3: Parametry modulu Evergreen Solar.....	39
Tabulka 4: Výchozí parametry modulu .....	41
Tabulka 5: Parametry modulu po degradaci .....	43
Tabulka 6: Srovnání hodnot modulu během degradace a regenerace .....	50

## 9 Příloha

Celkové schéma programu automatizace měření Agilent 34410A.

